

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

МОШКИН Владимир Иванович

ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ  
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ С ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ  
ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант  
доктор технических наук, профессор  
Угаров Геннадий Григорьевич

Курган – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ С ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	17
1.1 Классификационные признаки импульсных технологий.....	17
1.2 Импульсные технологические процессы и их основные параметры....	20
1.3 Эффекты импульсных механических воздействий.....	21
1.4 Приводы линейных машин для импульсных технологий.....	28
Выводы.....	41
ГЛАВА 2. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (ЛЭМД) С ИНТЕГРАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ .....	42
2.1 Оптимальные геометрические параметры двухзазорных магнитных систем импульсного ЛЭМД .....	42
2.2 Взаимосвязь основных геометрических параметров магнитной си- стемы импульсного ЛЭМД.....	53
2.3 Импульсные ЛЭМД с укороченными магнитными системами.....	58
2.3.1 Влияние укорочения магнитной системы на статические характе- ристики ЛЭМД с продольным магнитным полем.....	58
2.3.2 Влияние укорочения магнитной системы на статические характе- ристики ЛЭМД с поперечным магнитным полем .....	68
2.4 Влияние конструктивных параметров устройства удержания якоря на величину усилия удержания интегрированного ЛЭМД.....	72
2.5 Условия отрыва якоря интегрированного ЛЭМД.....	81
Выводы.....	89
ГЛАВА 3. РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ.....	91
3.1 Энергетическая структура электромеханического преобразователя	

электромагнитного типа.....	91
3.2 Концентрация магнитной энергии в рабочих воздушных зазорах импульсного ЛЭМД на этапе ее электромагнитного преобразования.....	94
3.3 Предельная механическая работа электромеханического преобразователя электромагнитного типа .....	102
3.4 Оценка эффективности способов концентрации магнитной энергии в импульсных ЛЭМД.....	106
Выводы.....	110
ГЛАВА 4. РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ.....	111
4.1 Энергетические режимы импульсного ЛЭМД.....	111
4.2 Энергетические характеристики электромеханического преобразования энергии в импульсном ЛЭМД при ненасыщенной магнитной системе.....	126
4.3 Критерии эффективности преобразования магнитной энергии в ЛЭМД.....	141
4.4 Влияние обобщенных режимных и конструктивных параметров импульсных ЛЭМД на эффективность электромеханического преобразования .....	147
4.5 Электромеханические характеристики энергетических режимов импульсных ЛЭМД продольного магнитного поля в функции перемещения .....	152
4.6 Сравнение магнитных циклов импульсного ЛЭМД с учетом мощности потерь в его обмотке.....	165
Выводы.....	172
ГЛАВА 5. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД.....	174
5.1 О связи энергии удара с интегральной работой импульсного ЛЭМД..	174
5.2 Взаимные соотношения в мощных импульсных электромагнитных машинах.....	180
5.3 О вводе сторонней механической энергии в импульсный линейный	

электрохимический преобразователь.....	188
5.4 Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей.....	198
5.4.1 Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных ЛЭМД с пружинным накопителем.....	198
5.4.2 Основные энергетические и динамические параметры однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной.....	211
5.5 Расчет основных параметров импульсного ЛЭМД.....	218
5.5.1 Расчет основных параметров ЛЭМД по заданной работе.....	218
5.5.2 Расчет основных параметров ЛЭМД по тяговому усилию.....	221
Выводы.....	228
ГЛАВА 6. РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД С ПОВЫШЕННЫМИ СИЛОВЫМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ.....	230
6.1 Рабочие процессы в импульсном ЛЭМД при его статическом нагрузении.....	230
6.1.1 Влияние нагружения импульсного ЛЭМД на его энергетические и динамические характеристики.....	230
6.1.2 Рабочие процессы импульсных ЛЭМД с регулируемым аккумуля- рованием магнитной энергии.....	236
6.2 Способ передачи дополнительной магнитной энергии в рабочие зазоры импульсного ЛЭМД.....	235
6.3 Рабочие процессы в импульсном ЛЭМД при рекуперации энергии в питающую сеть.....	233
6.4 Распределение потерь энергии в импульсных ЛЭМД линейных машин .....	238
6.5 Продолжительность включения импульсного ЛЭМД в приводе технологического оборудования.....	262
Выводы.....	268
ГЛАВА 7. КОНСТРУКТИВНЫЕ И СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ	



ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЛЭМД.....	269
7.1 Конструктивные схемы перспективного технологического оборудования с ЛЭМД.....	269
7.1.1 Импульсные механические воздействия в электротехнологических процессах.....	269
7.1.2 Сравнение конструктивных схем однообмоточных электромагнитных машин.....	280
7.2 Рекомендуемые схемы устройств питания и управления (УПУ) импульсными ЛЭМД от промышленной сети.....	289
7.2.1 Способы регулирования выходных параметров ЛЭМД.....	290
7.2.2 Исследование стабилизирующих свойств УПУ ЛЭМД.....	300
7.3 Питание передвижных установок с импульсными ЛЭМД от ёмкостных накопителей.....	307
7.4 Влияние импульсных ЛЭМД на колебания напряжения в электрической сети промышленного предприятия.....	312
7.5 Перспективные конструктивные схемы электромагнитных машин.....	321
7.6 Перечень реализованных технологий с участием автора.....	324
Выводы.....	325
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	326
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	328
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	356

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность избранной темы.** Одна из актуальных стратегических задач в Российской Федерации – это технологическая модернизация производственных процессов, направленная на создание конкурентоспособной техники для прогрессивных технологий в машиностроении, строительстве, горном деле и других отраслях. Значительная их часть выполняется с помощью импульсных технологий, которые позволяют получить конечный продукт с меньшими затратами энергетических и материальных ресурсов.

Наиболее эффективно эта проблема может быть решена средствами электромеханики. Это объясняется тем, что все производственные процессы являются электроэнергетическими. Общеизвестным фактом является отнесение электромеханических преобразователей энергии (ЭМП) к наиболее совершенным преобразователям [1; 2].

Существует обширная группа машин и механизмов (поршневые компрессоры, насосы, прессовое оборудование, молоты, перфораторы, сейсмоисточники, активаторы и др.), рабочие процессы в которых предполагают применение возвратно-поступательного движения рабочего органа по линейной траектории. Обычно для реализации такого рода движения с помощью традиционных электродвигателей между рабочим органом и приводным двигателем ставится дополнительное механическое устройство, преобразующее вращательное движение в возвратно-поступательное. Это может быть кривошипный механизм, кулачковый валик с толкателем, пара «винт-гайка», кулисы и т.д. В настоящее время до половины серийных электродвигателей используются для привода машин с линейной траекторией движения рабочих органов через подобные преобразователи движения. При этом дополнительные звенья в таком электроприводе увеличивают габариты, стоимость и снижают надежность всего устройства [3-6].

Для указанных случаев становится весьма привлекательным отказаться от преобразователей движения и создать привод непосредственно возвратно-поступательного движения. Такой привод в своей структуре должен содержать

главный силовой элемент – электрический двигатель возвратно-поступательного движения, который наилучшим образом согласован по роду движения с рабочим органом машины.

Только такой электрический привод возвратно-поступательного движения позволяет вводить в рабочую зону технологического объекта концентрированные потоки механической энергии высокой плотности в импульсной форме, что отмечено в работах [7-27].

Импульсный подвод энергии давно показал свою эффективность в технике, технологиях, испытательной аппаратуре и т. д. Недостатки пневматических, гидравлических и гидропневматических машин вибрационного и ударного действия и стремление к модернизации технологий, в которых они применяются, еще в 30-х годах прошлого века вызвали необходимость создания ударных машин с электроприводом. Под импульсным воздействием понимается подвод к технологическому объекту дискретных порций энергии с определенной длительностью, частотой повторения импульсов, скважностью и амплитудой. Известны многочисленные примеры эффективности таких воздействий в технологических операциях и процессах. Импульсный подвод энергии в ряде случаев имеет значительные преимущества перед непрерывным характером энергопотребления технологическим объектом. Это объясняется появлением ряда эффектов, которые сопровождают импульсный подвод энергии и связанные с ним повышение импульсной мощности, скорости ввода в объект механической энергии, пространственной концентрации этой энергии, нестационарности [28; 29].

В связи с этим возникает комплекс теоретических, экспериментальных, расчетных и инженерных задач по совершенствованию существующих и созданию новых импульсных электрических приводов возвратно-поступательного движения.

Силовые электромагнитные импульсные системы (СЭМИС), в состав которых входят импульсные линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД), обеспечивают наилучшие условия совместимости или интеграции приводного

двигателя и рабочего органа машины и поэтому представляются наиболее перспективными.

Импульсные ЛЭМД относятся к импульсным электромеханическим преобразователям (ЭМП) электромагнитного типа и представляют собой самостоятельный класс специальных электрических машин, обладающих рядом специфических свойств: ограниченностью механического перемещения, дискретным энергопреобразованием, циклическим характером работы. Они, как правило, приспособлены к определенным приводным устройствам и должны часто изготавливаться в одном с ними блоке. Поэтому импульсный ЛЭМД необходимо проектировать совместно с приводимой рабочей машиной и импульсной системой питания и управления [5; 9; 15].

Для реализации технологических процессов с высококонцентрированными потоками энергии с помощью импульсных ЛЭМД необходимо повысить их КПД, удельные энергетические и силовые показатели: энергии удара и тягового усилия, отнесенных к массе или к объему активных материалов двигателя. Анализ энергоемкости различных импульсных технологических процессов показывает, что достигнутый и требуемый уровни удельной энергии удара в электромагнитных машинах ударного действия составляют: для ручных машин соответственно 1...3 Дж/кг и 10...20 Дж/кг, для мощных молотов (с энергией удара до 30 кДж) – 2...6 Дж/кг и 7...12 Дж/кг, для переносных молотов (с энергией удара до 1 кДж) – 2...5 Дж/кг и 6...15 Дж/кг [30; 31].

Это свидетельствует о необходимости поиска путей повышения удельных силовых и энергетических показателей импульсных ЛЭМД. При этом для расширения технологических возможностей машин ударного действия с импульсными ЛЭМД требуется регулирование их выходных параметров: энергии удара (полезной работы), частоты ходов, тягового усилия.

**Степень разработанности темы исследования.** В электромеханике накоплен большой опыт решения вопросов энергопреобразования, расчета и практической реализации разнообразных импульсных линейных электрических машин. Значительный вклад в разработку этих проблем внесли

А.И. Москвитин, О.Д. Алимов, П.М. Алабужев, А.В. Гордон, Н.П. Ряшенцев, Ф.Н. Сарапулов, В.В. Ивашин, Е.М. Тимошенко, А.В. Фролов, Г.А. Сипайлов, Г.Г. Угаров, Б.Ф. Симонов, Ю.З. Ковалев, А.П. Тронов, А.Н. Мирошниченко, К.М. Усанов, А.Т. Малов, В.Ю. Нейман, В.Н. Федонин, В.Т. Караваев, А.В. Львицын, В.П. Певчев, С.Ю. Кудараускас (S. Kudarauskas), E.R. Laitwaite, Р.С. Аипов, И.Г. Ефимов, В.А. Каргин, А.И. Смелягин, Ю.Н. Казаков и другие специалисты. В известных работах [5; 9; 11-27] отражены результаты исследований линейных электроприводов, в том числе ударного действия, и их практическая реализация.

**Цели и задачи работы.** Цель работы состоит в разработке методов и технических средств повышения удельных энергетических и силовых показателей импульсных ЛЭМД, создании и внедрении их и машин на их основе для реализации технологических процессов с высококонцентрированными потоками энергии.

В связи с этим поставлены следующие **задачи исследований**.

1. Выявить требования к параметрам механической энергии в высококонцентрированных технологиях.
2. Разработать оптимальные конструкции магнитных систем с интегральными функциями структур.
3. Выявить условия и способы концентрации магнитной энергии в рабочих зазорах импульсных ЛЭМД.
4. Установить связь между уровнем концентрации магнитной энергии рабочих зазоров двигателя и конструктивно-режимными факторами.
5. Определить наилучший режим концентрации магнитной энергии рабочих зазоров двигателя на этапе трогания.
6. Разработать критерии оценки эффективности энергетических режимов импульсных ЛЭМД.
7. Установить взаимное влияние структурных подсистем ЛЭМД на эффективность энергетических режимов.

8. Определить функциональные связи электромеханических характеристик ЛЭМД с энергетическими режимами.

9. Разработать методы расчета импульсных ЛЭМД широкого диапазона энергий и частот воздействия на технологический объект.

10. Разработать энергоэффективные процессы с требуемым характером изменения параметров (регулируемые и стабильные).

11. Разработать схемные и конструктивные решения технологического оборудования с ЛЭМД.

### **Научная новизна:**

- впервые выявлены четырнадцать энергетических режимов электромеханического преобразования энергии в импульсном ЛЭМД, отличающиеся между собой степенью восстановления магнитной энергии, сконцентрированной в рабочих зазорах двигателя, при движении якоря. Среди них определены такие режимы, при функционировании по которым импульсный ЛЭМД способен радикально улучшить преобразование магнитной энергии рабочих зазоров в механическую работу. Так, энергетические режимы с возрастающим потокоцеплением и падающим током ( $\Psi_k > \Psi_n$ ,  $I_k < I_n$ ) при коэффициенте восстановления  $-1 < k_b < 0$  и тем более режим с неизменным потокоцеплением ( $\Psi_k = \Psi_n = \text{const}$ ) и с убывающим током позволят повысить свои удельную механическую работу и КПД в два и более раза, что подтверждено экспериментами;

- впервые установлены области допустимых сочетаний геометрических параметров элементов магнитных систем интегрированного ЛЭМД на основе общего магнитопровода;

- с помощью принципа взаимности для электромеханических систем обобщено соотношение между интегральной механической работой импульсного ЛЭМД, определяемой по статическим характеристикам, и энергией рабочего хода этого двигателя;

- теоретически обоснован и практически подтвержден факт уменьшения энергии удара импульсного ЛЭМД в случае ввода сторонней механической энергии в электромеханическую систему при совпадении направлений тягового

усилия и скорости движения якоря;

- определены оптимальные геометрические параметры цилиндрического ЛЭМД с двумя рабочими зазорами исходя из минимума объема его активных материалов;

- теоретически и экспериментально обоснованы условия укорочения длины магнитной системы импульсных ЛЭМД продольного и поперечного поля, разработаны конструкции импульсных ЛЭМД с двумя рабочими зазорами, имеющие повышенные в сравнении с известными удельные силовые показатели;

- выявлено влияние режимных и конструктивных параметров ударной машины с однообмоточным ЛЭМД и возвратной пружиной на его предельную ударную мощность, для ее повышения предложено использовать вместо однообмоточного двигателя разработанный двухобмоточный;

- разработаны на уровне изобретений устройства питания и управления ЛЭМД, обеспечивающие надежную и экономичную работу с регулированием энергии удара и частоты ходов, а также стабилизацию энергии удара при изменении напряжения источника.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в установлении следующих принципов повышения удельных силовых и энергетических показателей импульсных ЛЭМД: принцип укорочения магнитной системы (МС); принцип концентрации магнитной энергии в рабочих зазорах на этапе, предшествующем рабочему ходу якоря; принцип многозазорности МС.

**Практическая значимость работы** заключается:

- в разработке новых конструкций магнитных систем ЛЭМД: с укороченной длиной магнитной системы продольного и поперечного поля, с ферромагнитным направляющим корпусом, с встроенным в магнитную систему устройством удержания якоря, позволяющее в 1,3...1,5 раза повысить удельные значения тягового усилия, в 2...2,5 раза – механической энергии и КПД двигателей, расширить их функциональные возможности и область применения;

- в разработке инженерных методик определения геометрических размеров ЛЭМД с заданными полезной работой и тяговым усилием;

- в разработке и испытании в лабораторных и производственных условиях различных конструкций импульсных ЛЭМД и созданных на их основе электромагнитных машин, защищенных 8 авторскими свидетельствами и 13 патентами на изобретения;

- в разработке универсальных УПУ, обеспечивающих регулирование частоты ходов, энергии удара с ее стабилизацией при изменении напряжения источника.

Исследования, обобщенные в диссертации, являются продолжением работ по созданию импульсных ЛЭМД и машин на их основе, предназначенных для механизации трудоемких процессов горного, строительного и машиностроительного производств и соответствуют программам и темам:

- научно-координационный план СО РАН по проблеме машиностроения 1.11.1 – «Теория машин и систем машин» по теме «Динамика и синтез механизмов для возбуждения силовых воздействий большой интенсивности»;

- приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации: «Энергетика и энергосбережение»;

- приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России: «Энергоэффективность и энергосбережение»;

- критическим технологиям: «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»;

- заданию № 2014/77 по теме № 8.2654 «Использование энергоэффективных импульсных линейных электромагнитных двигателей» на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки России (2014-2015 гг.);

- НИР ФГОУ ВПО «Курганский государственный университет» по теме № 195 «Импульсные ЛЭМД с повышенными энергетическими и силовыми показателями» (2006-2010 гг.) и по теме № 263 «Исследование линейного электромагнитного привода машин для импульсных технологий» (2011-2015 гг.)



**Методология и методы исследования.** В работе использованы фундаментальные законы и уравнения электродинамики и теории электрических и магнитных цепей, теории электрических машин и автоматизированного электропривода. Поиск количественных соотношений между исследуемыми параметрами осуществлялся с помощью аналитических методов математического анализа и численных методов решения задач. Для ускорения решения поставленных задач использовались программы MathCad, Statistica, для математического моделирования магнитных систем импульсных ЛЭМД использовалась программа Elcut. В ходе исследования экспериментальным методом определялись тяговые статические и динамические характеристики ЛЭМД.

**Положения, выносимые на защиту:**

- применение энергетических критериев для определения эффективности магнитных циклов может использоваться для самостоятельной оценки энергетических показателей импульсных ЛЭМД;

- укорочение длины магнитной системы импульсного ЛЭМД при сохранении неизменным объема его активных материалов позволяет повысить их удельные силовые показатели до 50% ;

- определение рациональных геометрических размеров импульсных ЛЭМД позволяет разработать инженерную методику их расчета по заданной интегральной механической работе при минимальном объеме активных материалов;

- принцип взаимности для электромеханических систем позволяет получить обобщенное соотношение между интегральной механической работой импульсного ЛЭМД, определяемой по статическим характеристикам, и энергией рабочего хода этого двигателя;

- концентрация магнитной энергии в рабочих зазорах на этапе трогания, позволяет создать импульсные ЛЭМД, обладающие повышенными в 2-2,5 раза и выше энергетическими показателями.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Полученные результаты исследований подтверждаются корректностью постановки задач, обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемых математиче-

ских моделей, а также степенью совпадения теоретических и практических результатов, полученных экспериментально на реальных моделях импульсных ЛЭМД в лабораторных и производственных условиях с использованием специально разработанных стендов и методик.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7-ой научно-технической конференции «Повышение надежности, экономичности и конкурентоспособности асинхронных электродвигателей и электроприводов», г. Кемерово, 1992 г.; на десятой и одиннадцатой научно-технических конференциях «Электроприводы переменного тока», г. Екатеринбург, 1995 и 1998 гг.; на Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин», г. Омск, 1995 г.; на XV Международной научно-технической конференции «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции», г. Тамбов, Россия, 2009 г.; на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК», г. Саратов, Россия, 2010 г.; на VI и VII Всероссийских научно-практических конференциях «Инновационные технологии в обучении и производстве», г. Камышин, 2010 и 2014 гг.; на I Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству», г. Челябинск, 2011 г.; на VII Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании», г. Варна, Болгария, 2012 г.; на пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» – ЭППТ 2012, г. Екатеринбург, Россия, 2012 г.; на LI и LIII Международных научно-технических конференциях «Достижения науки – агропромышленному производству», г. Челябинск, 2013 и 2014 гг.; на III Международной конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» – АПЭЭТ-2014, г. Екатеринбург, Россия, 2014 г.; на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» – АПЭП-2014, г. Саратов, Россия, 2014 г.; на IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, г. Пермь, Россия, 2016 г.; на Международной науч-

но-технической конференции « Актуальные проблемы электронного приборостроения» – АПЭП-2016, г. Саратов, Россия, 2016 г.; на 6-й Международной научно-практической конференции ЭКСИЭ - 06 «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии», г. Екатеринбург, Россия, 19 апреля 2017 г., на Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Россия, 16-19 мая 2017 г.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 81 научная работа общим объемом 79 п. л. В их числе 4 монографии и 19 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК. Получено 1 авторское свидетельство СССР и 13 патентов РФ на изобретения. Результаты исследований отражены в 3 отчетах по г/б НИР и отчете о проведении фундаментальных исследований в рамках выполнения базовой части государственного задания МОН РФ № 2014/77 по теме № 8.2654 «Использование энергоэффективных импульсных линейных электромагнитных двигателей».

**Реализация результатов работы** состоит в том, что

- разработаны и внедрены машины и оборудование с импульсными ЛЭМД в машиностроении, литейном и металлургическом производствах, электронной и электротехнической промышленности, строительстве, на железнодорожном транспорте, сельскохозяйственном производстве: на технологических операциях проколки отверстий в корпусах изделий из оцинкованного листа (Омутнинский металлургический завод), на операциях клеймения изделий (машиностроительные предприятия гг. Кургана и Саратова), на операции завальцовки корпусов химических источников тока (Новосибирский завод химконцентратов), на операции вырубки слюды (Балашовский слюдяной комбинат), на операциях изготовления фурнитуры кожгалантерейных изделий (Саратовская кожгалантерейная фабрика), на операциях погружения стержневых заземлителей в грунт (ООО «Инко Строй-Монтаж», г. Саратов), на операциях холодной штамповки и сборки (Саратовский завод электротермического оборудования), на операциях локального вытеснения металла при наплавке (сварочные производства предприятий г. Саратова), на операциях терморезания при восстановлении железнодорожных

колесных пар (Саратовское депо), на операциях сводообрушения в мукомольном производстве (Саратовская область);

- материалы диссертационной работы были переданы в ООО НПП «АВИАСТЭК» в виде технологической документации на три типоразмера импульсных ЛЭМД для изготовления и реализации. Изготовленные двигатели с 2009 г. поставляются по заказам организациям для механизации технологических процессов (Приложение);

- разработанные методы проектирования и моделирования импульсных ЛЭМД продольного и поперечного поля внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет» в виде научных монографий и учебных пособий по дисциплинам «Введение в специальность», «Электрические машины», « Преобразовательная техника в электроприводе», «Электротехнологические промышленные установки» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и приложения общим объемом 361 страница, иллюстрирована 125 рисунками, 14 таблицами. Список использованной литературы содержит 233 наименования.

# **ГЛАВА 1. ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ С ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

## **1.1 Классификационные признаки импульсных технологий**

К традиционным импульсным технологиям, используемым на всем этапе существования цивилизации, относятся технологии, связанные с обработкой природных и искусственных материалов. Реализация таких производственных процессов осуществлялась устройствами и машинами ударного, вибрационного и виброударного действия. Все эти технические средства использовали механическую энергию с различными значениями параметров: силы, энергии и частоты воздействия.

В ряде случаев такие процессы наиболее эффективно осуществляются с помощью импульсных технологий, характеризующихся прерывистой посылкой отдельных порций энергии к объекту воздействия и реализуемых посредством взрывчатых веществ, магнито-импульсных и электроразрядных установок, ударных машин и других устройств импульсного действия. Такой способ подвода энергии позволяет за счет дозировки длительности и интенсивности воздействия резко повысить плотность энергии, вводимой в объект, оптимально управлять нестационарными механическими, тепловыми, химическими и другими процессами и получить ряд эффектов, свойственных конкретным технологическим процессам.

Импульсный подвод концентрированных потоков энергии в ряде случаев имеет значительные преимущества перед непрерывным характером энергопотребления технологическим объектом: появляется возможность обработки материалов, неподдающихся обработке традиционными способами, получение новых структур материалов и т. д. [31-33]

Как правило, импульсные установки имеют ряд преимуществ по сравнению с устройствами, работающими в непрерывном режиме при равной средней

потребляемой мощности: меньшие габариты, более высокие удельные энергетические показатели. Объясняется это появлением ряда специфических эффектов, сопровождающих импульсный подвод энергии: повышения импульсной мощности, изменения силы, скорости ввода в объем энергии, пространственной концентрации мощности и др. [28; 31-33]. В ряде случаев определяющую роль в импульсных процессах и технологиях играет механическая энергия.

В связи с этим возникает комплекс теоретических, экспериментальных, расчетных и инженерных задач по совершенствованию существующих и созданию новых импульсных силовозбудителей. Импульсные воздействия на технологический объект различаются как по виду подводимой энергии, то есть моноэнергетическими потоками энергии (электрического или электромагнитного поля, механической, тепловой, химической и др.) и их комбинациями, так и по характеру параметров энергетических потоков (Рисунок 1.1).

Следует учесть, что в большинстве электротехнологических установок электрическая и магнитная энергия преобразуется в механическую, тепловую или химическую энергию и, таким образом, сам технологический объект является своеобразным технологическим преобразователем электрической энергии в другие виды энергии.

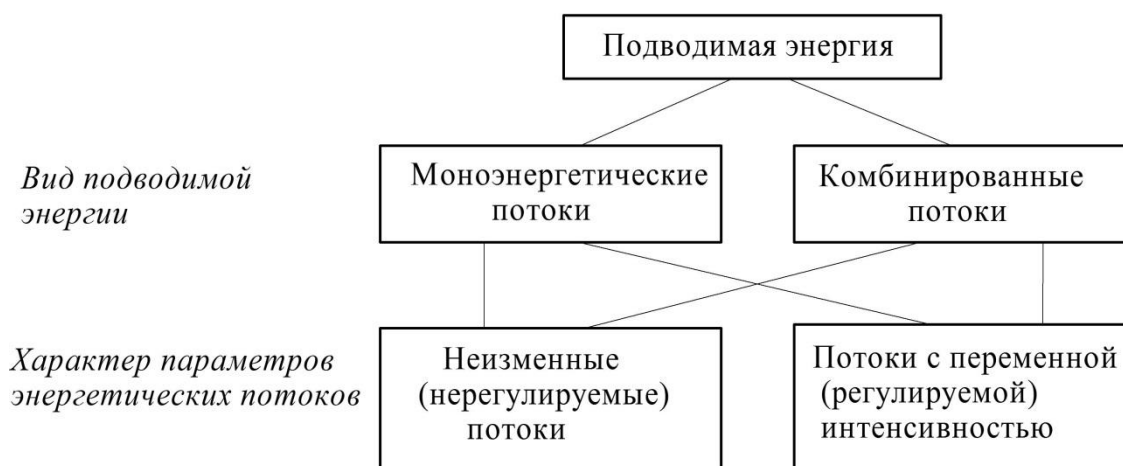


Рисунок 1.1– Классификация импульсных технологий по видам подводимой энергии и характеру параметров энергетических потоков

Вследствие этого происходит пространственное совмещение рабочей зоны, куда вводится энергия, и зоны преобразования энергии в технологическом

объекте. Вместе с тем происходит и временное совмещение взаимодействий энергий, обуславливающее реализацию данного технологического процесса. Такое совмещение, порождающее ряд причинно-следственных и обратных связей, необходимо учитывать при расчете режимов работы установок и устройств управления источником электрической энергии.

Технологические процессы можно разделить на два класса – контактные и бесконтактные. В первом случае механическая, тепловая, электрическая и др. энергия подводится от источника через контакт с поверхностью технологического объекта. Во втором случае между источником энергии и технологическим объектом существует промежуточная зона, заполненная некоторой средой (газовой, жидкой, твердым телом), которая может участвовать в преобразовании и передаче энергии объекту [29]. Типичным примером контактного подвода энергии являются традиционные процессы обработки давлением, в которых главную роль играет механическая энергия, передаваемая объекту через волновод, инструмент. Примерами бесконтактных процессов являются электросварочные, процессы импульсной обработки в магнитном поле или обработки разрядом в жидкой среде. Возможно и сочетание контактного и бесконтактного подвода энергии.

Определим шесть классификационных признаков технологий, использующих импульсную механическую энергию (Рисунок 1.2).

Наряду с непрерывными и импульсными технологиями существуют и комбинированные, в которых возможны любые сочетания подвода видов энергии, как в импульсной, так и традиционной форме. По временным характеристикам воздействующие физические поля могут быть постоянными, вибрационными, импульсными и комбинированными.

Импульсные механические воздействия на технологический объект различаются по величине энергии, силе (давлению), частоте соответствующих импульсов. Процессы могут происходить при низких ( $1 \dots 10$  Дж), малых ( $1 \dots 10^3$  Дж), средних ( $1 \dots 10^6$  Дж) и высоких энергиях (свыше  $10^6$  Дж) [34].



Рисунок 1.2 – Классификационные признаки технологий, использующих импульсную механическую энергию

Усилия воздействия могут быть низкими (0...1 Н), малыми (0...100 Н), средними (0...1000 Н), высокими (свыше 1000 Н). По частоте воздействия различают единичные (одиночный удар), низкочастотные (до 1 Гц), средней частоты (1...50 Гц), высокочастотные (свыше 50 Гц). По характеру воздействия – ударные, вибрационные, комбинированные. В свою очередь комбинированные воздействия могут создаваться из вибрационных и ударных (виброударные), статических и динамических (статико-динамические) воздействий.

Энергоносителями силовозбудителя могут быть электрическое или магнитное поля, химическая, пневматическая, гидравлическая энергия и комбинированные энергоносители (электромагнитные, электрогидравлические и т. д.).

## 1.2 Импульсные технологические процессы и их основные параметры

Любой технологический процесс характеризуется некоторым множеством параметров, определяющих его выходные технические и экономические показатели. Среди них: производительность, удельные затраты энергии, материалов,



труда, масса и габариты оборудования, капиталоемкость, себестоимость готового изделия (продукта) и многие другие.

К входным параметрам импульсного технологического процесса следует отнести энергию и частоту воздействия. В ряде случаев необходимо учитывать силу воздействия, форму силовых импульсов, скважность. Как правило, технологический объект является с энергетической точки зрения преобразователем энергии. При этом может быть получена недостижимая для других технологий концентрация энергии в самом объекте при точном ее дозировании в пространстве и во времени. Это особенно эффективно при процессах, в которых сочетается одновременно или поочередно несколько видов взаимно дополняющих друг друга энергетических воздействий. Наиболее сильными интенсификаторами комбинированных процессов являются механические воздействия.

Технологические требования для отдельных импульсных процессов в виде диапазонов механической энергии и частот воздействия приведены в таблице 1.1. По нашему мнению, именно эти параметры определяют главным образом осуществимость и эффективность импульсного технологического процесса [34; 35].

### **1.3 Эффекты импульсных механических воздействий**

Технологическая модернизация производственных процессов, являясь одной из актуальных современных стратегических задач в России, наиболее эффективно может быть решена средствами электромеханики, поскольку все производственные процессы являются энергетическими и энергия для них производится из природных ресурсов с помощью преобразователей энергии. Общеизвестным фактом является отнесение электромеханических преобразователей энергии к наиболее совершенным преобразователям.

Таблица 1.1 – Параметры импульсных технологических процессов

Область применения	Технологические операции	Диапазоны параметров	
		Энергия воздействия, Дж	Частота воздействия, Гц
1. Машиностроение	Динамическое упрочнение деталей	0,5...100	0,1...100
	Правка листовых металлических заготовок	5...600	1...50
	Холодная протяжка металлических труб	100...1000	2...5
	Холодная штамповка	1...1000	1...25
	Клеймение	10...100	1...10
	Проковка сварочных швов	1...50	1...50
2. Строительство	Разрушение кирпичных кладок	4...15	25...50
	Бурение отверстий в кирпичных, бетонных стенах	1...15	25...50
	Разрушение бетонных перекрытий, вскрытие асфальтных покрытий	15...50	15...25
	Погружение свай	$2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$	1...3
	Уплотнение грунтов	от 200	15...75
3. Поиски полезных ископаемых	Рудная селеноразведка, сейсморазведка нефти и газа, отбор керна	25...1000	1...10
4. Химическая промышленность	Виброперемешивание в массообменных аппаратах	100...1000	1...100
5. Специальные работы	Затяжка резьбы, разборка трубопроводов	10...300	1...5
	Забивка металлических анкеров в грунт	100...500	1...10
	Выпрессовка макетов и проверка усилия закусывания их в трубе	50...350	0,1...1
	Сборка траков гусеничных машин	30...200	0,1...2
6. Местная и швейная промышленность	Пробивка и установка металлической фурнитуры на кожгалантерейных изделиях	10...40	1...5
	Установка металлических кнопок на швейные из-	10...30	1...10

Область применения	Технологические операции	Диапазоны параметров	
		Энергия воздействия, Дж	Частота воздействия, Гц
	деля		
7. Литейное производство	Уплотнение формовочной смеси	100...300	1...8
	Обрубка литников	100...1000	1...10
8. Сельское хозяйство	Водоподача	1...50	10...100
	Виброуборка плодов	1...10	2...10
	Разрушение кольматанта в артезианских скважинах	20...100	1...15
	Вибросортировка	100...500	10...50
	Виброобмолот	150...400	25...50
	Вибровспашка	100...500	10...20
	Прессование шерсти	50...200	0,1...1
	Сводообрушение в бункерах	50...300	0,1...3
	Перемешивание молока	30...200	0,3...1
	Дозирование и раздача кормов	20...200	1...3
	Вibroизмельчение	50...300	25...100
	Вибросушка	30...50	25...100
	Погружение стержней и труб при обустройстве пастбищ и скважин на воду	50...1000	5...8
9. Электротехнология	Привод режущего инструмента при наплавке	10...30	15...30
	Привод для термосилового вытеснения металла	10...30	10...20
	Привод для получения зубчатого профиля при наплавке	10...20	10...35

Использование энергии в различных технологиях может быть как непрерывным, так и дискретным. Несмотря на преимущественное распространение в технологических процессах постоянного потока энергии, в ряде случаев импульсный подвод энергии в рабочую зону давно показал свою эффективность в технике, технологии, медицине, научных исследованиях, испытательном оборудовании и т.д. [36-38].

Сделаем попытку систематизации и выявления специфических эффектов, возникающих в зоне технологического объекта (ТО) при воздействии на него силовых механических импульсов. Под силовым механическим импульсным воздействием понимается подвод к ТО дискретных порций энергии с определенной длительностью, амплитудой, частотой повторения импульсов и их скважностью. Несмотря на большое число и разнообразие объектов силового механического импульсного воздействия на ТО, можно установить общие принципиальные особенности таких воздействий на технологический процесс. Это позволит объяснить и определить эффект от импульсного подвода механической энергии, выявить новые технологии, где такие эффекты могут быть обнаружены [28; 39].

Разделим эффекты, возникающие при импульсных способах подвода механической энергии к ТО, на эффекты, относящиеся к источнику питания и эффекты, возникающие в зоне воздействия на объект, исходя из закона сохранения энергии.

**Эффект увеличения импульсной мощности.** Этот эффект обусловлен возможностью получения от источника с номинальной мощностью  $P_{\text{ном}}$  временно мощности  $P_{\text{м}}$ , существенно превосходящей номинальную. Это следует из очевидного соотношения

$$P_{\text{и}} \cdot t_{\text{и}} \cdot \eta = P_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}, \quad (1.1)$$

где  $P_{\text{и}}$ ,  $P_{\text{в}}$  – средние значения мощностей источника и объекта воздействия;  $t_{\text{и}}$ ,  $t_{\text{в}}$  – время отдачи энергии источником и время передачи энергии объекту соответственно.

Из (1.1) следует, что если  $t_{\text{и}} \gg t_{\text{в}}$ , то  $P_{\text{в}} \gg P_{\text{и}}$ . То есть мощность, введенная

в технологический объект, во много раз превышает мощность, потребляемую от первичного источника энергии. Из (1.1) найдём мощность, введённую в объект воздействия:

$$P_B = P_{\text{и}} \cdot \eta \cdot k_p ,$$

где  $k_p = t_{\text{и}} / t_B$  - коэффициент трансформации мощности.

Следует учесть, что для большинства технологических процессов интенсивность воздействия влияет на развивающиеся процессы, но для некоторых объектов необходимо повышение вводимой мощности выше некоторых пороговых значений.

**Эффект изменения амплитуды силы.** Увеличения амплитуды силы в зоне объекта воздействия можно достичь, изменяя время приложения силы  $t_B$  к рабочему органу машины в объекте воздействия. Это следует из закона сохранения импульса:

$$F_p \cdot t_p = F_B \cdot t_B , \quad (1.2)$$

где  $F_p$  и  $F_B$  усилия разгона и воздействия соответственно;  $t_p$  – время разгона рабочего органа машины.

Из выражения (1.2) следует:

$$F_B = F_p \cdot k_c ,$$

где  $k_c = t_p / t_B$  - коэффициент трансформации силы.

Иногда требуется уменьшить силу воздействия в технологическом объекте с целью повышения надежности узла передачи механической энергии от генератора импульсной мощности в рабочую зону. Такая задача возникает в машинах ударного действия, например, при забивке железобетонных свай. В этом случае для предохранения торцевой части свай от разрушения целесообразно снижение амплитуды импульса силы при одновременном увеличении времени воздействия. Достигается это взаимодействием ударника со свайей через различные промежуточные среды.

Увеличения или уменьшения силы в объеме воздействия можно достичь за счёт трансформации перемещений  $l_g$  рабочего органа силового двигателя и  $l_B$  рабочего инструмента в зоне воздействия. Это следует из соотношения

$$F_g \cdot l_g = F_B \cdot l_B, \quad (1.3)$$

где  $F_g$  – сила, создаваемая генератором механической энергии.

Из выражения (1.3) следует:

$$F_B = F_g \cdot k_l,$$

где  $k_l = l_g / l_B$  – коэффициент трансформации перемещений.

**Эффект изменения скорости ввода механической энергии в зону объекта.** Такая возможность видна из соотношения:

$$F_B \cdot t_B = m \cdot v, \quad (1.4)$$

где  $m$ ,  $v$  – масса и скорость рабочего органа, воздействующего на объект.

Из (1.4) следует:

$$v = F_B \cdot t_B / m.$$

Изменяя силу или время воздействия, можно регулировать скорость ввода механической энергии в объект.

Редуцирование мощности, силы, перемещения, скорости можно осуществить в конкретных условиях за счёт пневматических, гидравлических, рычажных и других трансформаторов.

**Эффект пространственной концентрации мощности.** Данный эффект проявляется в объекте воздействия за счёт высокой скорости ввода удельной энергии через поверхность  $S$ :

$$P_s = P_B / S$$

или в объём  $V$ :

$$P_V = P_B / V.$$

Плотность потоков мощности  $P_s$  и  $P_V$  и высокая объемная концентрация определяется, кроме  $P_B$ , уменьшением площади воздействия на объект или уменьшением объёма зоны обработки. Указанные эффекты концентрации играют особую роль в том случае, когда их интенсивность превысит некоторые пороговые или критические для данного технологического процесса показатели, недоступные при непрерывном подводе энергии в отличие от импульсного, после чего резко падает сопротивление процесса его развитию в заданном направ-

лении. Это, например, касается процесса формообразования твёрдых тел и отражает энергетическую природу взаимодействия с объектом.

**Эффект нестационарности.** Под эффектом нестационарности понимается возможность управления концентрацией энергии во времени и в заданном пространстве за счёт выбора времени или интенсивности, либо обоих факторов одновременно. Данный эффект позволяет в ряде случаев осуществить оптимальный режим процесса. Эффект нестационарности проявляется, например, при импульсной обработке материалов. Известно, что поведение материалов существенно отличается при непрерывном воздействии на них статических нагрузок или прерывистом (импульсном) воздействии. В последнем случае напряжения в объекте локализованы и соответственно вызывают местную деформацию. При этом время является главным фактором, определяющим напряжения в материале и их распределение. Например, в мягкой стали при статической нагрузке обычно имеет место внутреннее скольжение, а при импульсной нагрузке – двойникование, поскольку за короткое время другие реакции не могут произойти. Подобного рода эффекты используются в технологических целях, например, при обработке материалов взрывом, машинами ударного действия. Эффект нестационарности может быть использован более оптимально, если изменять не только длительность импульса, но и длительность фронтов и форму импульса. Регулируя интенсивность и скорость активного воздействия можно получить при импульсном подводе энергетические характеристики рабочей зоны, принципиально недостижимые при непрерывном подводе энергии.

**Волновые эффекты.** При создании динамических нагрузок в очаге деформации возникают механические волновые эффекты, при которых за счёт использования отражённых волн удается в несколько раз увеличить количество энергии, вводимой в технологический объект, и тем самым существенно повысить эффективность технологического процесса[39; 40]. Использование волнового эффекта нашло отражение в статико-импульсной обработке (СИО) материалов [38]. Практически это достигается за счёт использования ударных систем с промежуточным звеном-волноводом, а конструкция ударной машины позволяет

длительное время удерживать боек и волновод в контакте после совершения ударного воздействия. При СИО в очаге деформации формируются пролонгированные импульсы, энергия которых в 2-3 раза выше по сравнению с импульсами, возникающими при обычном способе ввода энергии.

Использование приведённых выше эффектов в ряде случаев резко упрощает технологические устройства в целом и повышает технико-экономическую эффективность производственного процесса. Сравнение непрерывного и импульсного процессов при условии обеспечения производства продукта с заданным качеством в ряде случаев существенно уменьшает стоимость технологического оборудования, габариты, занимаемые площади, улучшает условие эксплуатации. Известны примеры, когда стоимость импульсных установок, а так же готовой продукции снижается в десятки раз по сравнению с традиционными. Так, стоимость установки для штамповки взрывом в 40 раз меньше, чем прессового оборудования одинаковой мощности [36].

#### **1.4 Приводы линейных машин для импульсных технологий**

Большие различия в конструктивном исполнении, технических характеристиках и компоновках передаточных узлов в широком спектре машин, а также разнообразие эксплуатационных требований предопределили многообразие типов приводов (Рисунок 1.3).

Основные достоинства пневмопривода - простота конструкции, пожаробезопасность и высокая надёжность - способствовали широкому распространению его при механизации и автоматизации литейного производства. Недостатки: низкая производительность и КПД, не превышающий 11 %, повышенный шум при работе; быстрый износ и сложность обеспечения надёжности уплотнений, что резко снижает ресурс пневмодвигателей. Так, диафрагменные пневмодвигатели, используемые в приводе прессов малых усилий на заводах радиотехнической промышленности, выдерживают 500 - 600 тыс. включений [36], уплотнения поршневых пневмодвигателей истираются после 10 - 15 тыс. ходов [37]. Способность воздуха сжиматься и расширяться является одной из основных причин





ются утечки масла, что вызывает опасность воспламенения, если поблизости находится открытое пламя или расплавленный металл.

Пневмогидравлический привод сочетает преимущества как пневматического по лёгкости управления, точности слежения, так и гидравлического привода, имея повышенное в 1,5 – 3 раза [40], по сравнению с пневмоприводом, быстродействие и малые габаритные размеры исполнительных устройств. К недостаткам этого привода относится высокая стоимость и конструктивная сложность, что ведёт к низкой надёжности.

Электрогидравлический привод получил широкое распространение в тормозах подъёмно-транспортных машин, допускает регулирование хода и скоростей прямого и, особенно, обратного ходов. Усилие штока не зависит от его положения и практически постоянно на всей длине рабочего хода. По сравнению с электромагнитами электрогидравлические привода имеют меньшую стоимость и повышенную долговечность, потребляют меньшую мощность, на их изготовление расходуется в 8 - 10 раз меньше меди [40]. Их преимуществом является и то, что при обратном ходе поршня они превращаются из источника механической энергии в демпфер-замедлитель с регулируемой скоростью исполнительного органа. Однако электрогидравлические привода можно использовать только в положении, близком к вертикальному (отклонение от вертикали не более  $15^\circ$ ). Они имеют большее, по сравнению с электромагнитами, время срабатывания, изменяющееся в зависимости от температуры окружающей среды, влияющей на вязкость рабочей жидкости, и требуют надёжных уплотнений.

Магнитогидравлический привод сочетает преимущества электромагнитного и электрогидравлического приводов, отличается плавным процессом включения даже при недогрузках, отсутствием вращающихся частей и малым износом поступательно движущихся элементов, а также простотой конструкции. Однако он в несколько раз тяжелее электрогидравлического привода, для его изготовления требуется в 2 - 5 раз больше обмоточных проводов, а в установившемся режиме он требует мощность в 8 - 10 раз большую, чем электрогидравлический привод [40].

Наиболее распространённый практически во всех отраслях промышленности электромеханический привод включает в себя электрический двигатель вращательного движения и механическую передачу, преобразующую вращательное движение электродвигателя в возвратно-поступательное движение рабочего органа. Самыми распространёнными механическими звеньями привода являются кривошипные передачи. Зависимости массы  $m$ , мощности электродвигателя  $P_{эд}$ , частоты ходов в минуту  $n$  от номинального усилия  $F$  кривошипных приводов простого действия, построенные на основании литературного обзора, показаны на рисунке 1.4.

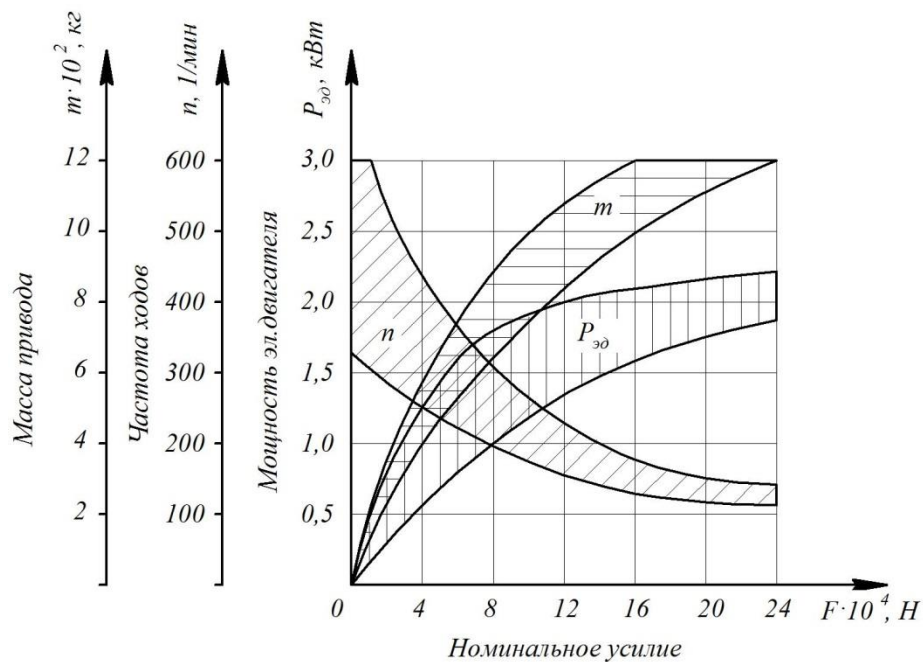


Рисунок 1.4 – Характеристики кривошипных приводов простого действия

Основное преимущество кривошипных приводов - высокая производительность, однако они имеют и ряд существенных недостатков: длинные кинематические цепи с большим числом промежуточных звеньев, потребность в частой и обильной смазке, быстрый износ вращающихся узлов.

Из-за наличия в механических передачах люфтов, трения, упругих деформаций, неравномерности передачи движения эти приводы часто не удовлетворяют требованиям по надёжности оборудования. Поэтому в последнее время всё шире используется другой способ получения линейного движения, который опирается на непосредственное преобразование электрической энергии в воз-

вратно-поступательное движение с помощью линейных электрических двигателей (ЛЭД), представляющих собой самостоятельный класс электрических машин.

Среди механических передач электромеханических приводов также широкое распространение получили передачи зацеплением (зубчато-реечные, гайка-винт, цепные), трением (фрикционные, канатные, со стальной лентой), рычажные и другие. Представление о рабочих перемещениях и скоростях реализуемых электромеханическими приводами, даёт рисунок 1.5 [43].

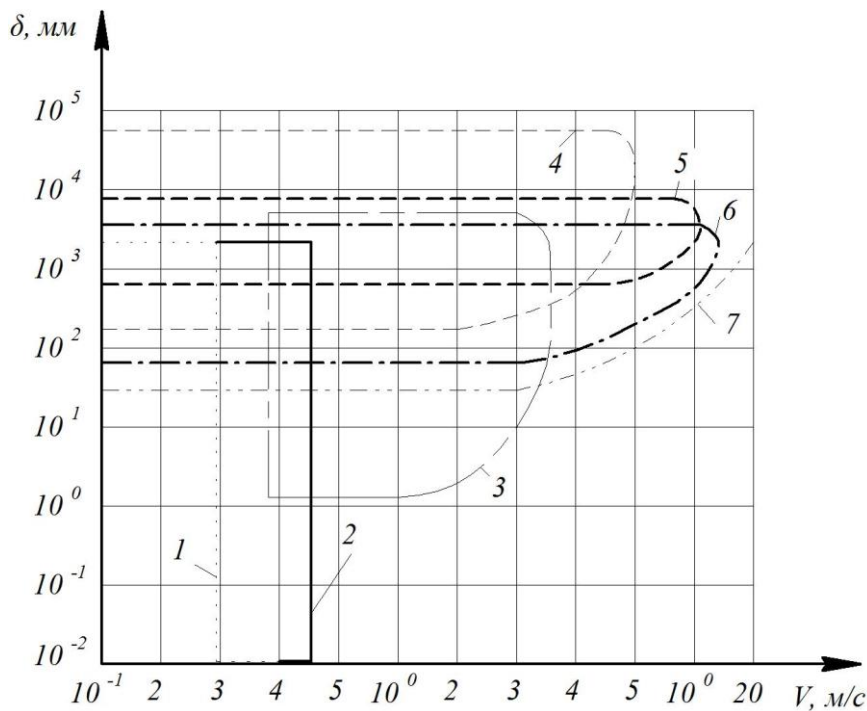


Рисунок 1.5 – Диапазоны рабочих перемещений  $\delta$  и скоростей  $V$ , реализуемые электромеханическими приводами: 1 – с винтовыми передачами с резьбой; 2 – с винтовыми передачами с обкатом; 3 – с цилиндрическими передачами; 4 – с канатно-барабанными передачами; 5 – с цепными передачами; 6 – с зубчато-реечными передачами; 7 – с фрикционными передачами.

По принципу действия, определяющему конструктивные особенности и технические возможности, ЛЭД подразделяются на следующие основные виды: индукционно-динамические (ЛИДД), магнитоэлектрические (ЛМЭД), магнито-стрикционные (ЛМСД), электрострикционные (ЛЭСД), асинхронные (ЛАД), электродинамические (ЛЭДД), электромагнитные (ЛЭМД)[9].

По простоте конструкции ЛИДД приближаются к электромагнитным ЛЭМД. При протекании по катушкам возбуждения импульса тока, магнитный

поток проходит через зазор между короткозамкнутыми витками на якоре и соответствующими катушками. Время срабатывания ЛИДД составляет  $1 \cdot 10^{-3}$  с на длине хода до 20 мм при КПД 30–40 %. Экспериментальные исследования ЛИДД показали, что средняя сила в форсировочных режимах может достигать 250 – 400 Н на килограмм массы индуктора [9].

В магнитоэлектрических двигателях обмотка возбуждения, питаемая постоянным током, заменена постоянным магнитом, поле которого взаимодействует с переменным полем, создаваемым обмотками. Рабочие процессы магнитоэлектрического и электродинамического двигателей подобны, так как постоянный магнит обычно представляют как фиктивный контур возбуждения. Машины с постоянными магнитами практического применения в качестве ударных машин пока не получили. Однако достигнутый прогресс в области новых сплавов для постоянных магнитов позволяет использовать их как источник магнитного поля в машинах данного типа, так как удельная магнитная энергия современных постоянных магнитов может быть больше, чем у электромагнитов. Это преимущество особенно проявляется у машин малой мощности, так как магнитная энергия постоянных магнитов пропорциональна кубу линейных размеров, а энергия электромагнита - четвёртой степени линейных размеров.

Линейные магнитострикционные двигатели применяются в буровых и породоразрушающих машинах, основанных на использовании звуковых вибраторов. Достоинством ЛМСД в данной области применения являются высокий моторесурс, превышающий 5000 часов при общем КПД преобразования энергии 65 %, большие удельные мощности, достигающие до  $10 \text{ кВт/см}^2$  [9]. Однако в приводе кузнечно-прессового оборудования ЛМСД не нашли применения из-за малых величин рабочего хода, не превышающих 2 мм, удельной полезной работы, больших линейных размеров, дороговизны.

Линейные электрострикционные двигатели имеют простую конструкцию, малые габариты, развивают тяговое усилие до 100 Н, имеют КПД 65 %. ЛЭСД обладают высокой технологичностью изготовления и надёжностью работы, определяемой отсутствием обмоток возбуждения, низкой металлоёмкостью, ко-

торая может быть сведена к нулю, высокими удельными показателями. В настоящее время основная область применения ЛЭСД - обеспечение прецизионных линейных перемещений, привод отдельных узлов магнитофонов, вибрационных устройств. В приводе кузнечно-прессового оборудования ЛЭСД не используется из-за низких значений тяговых сил, перемещений, недостаточной динамической прочности якоря.

На рисунке 1.6 представлены типичные для линейного электрического привода диапазоны рабочих перемещений и скоростей. Все такие приводы можно разбить на три группы.

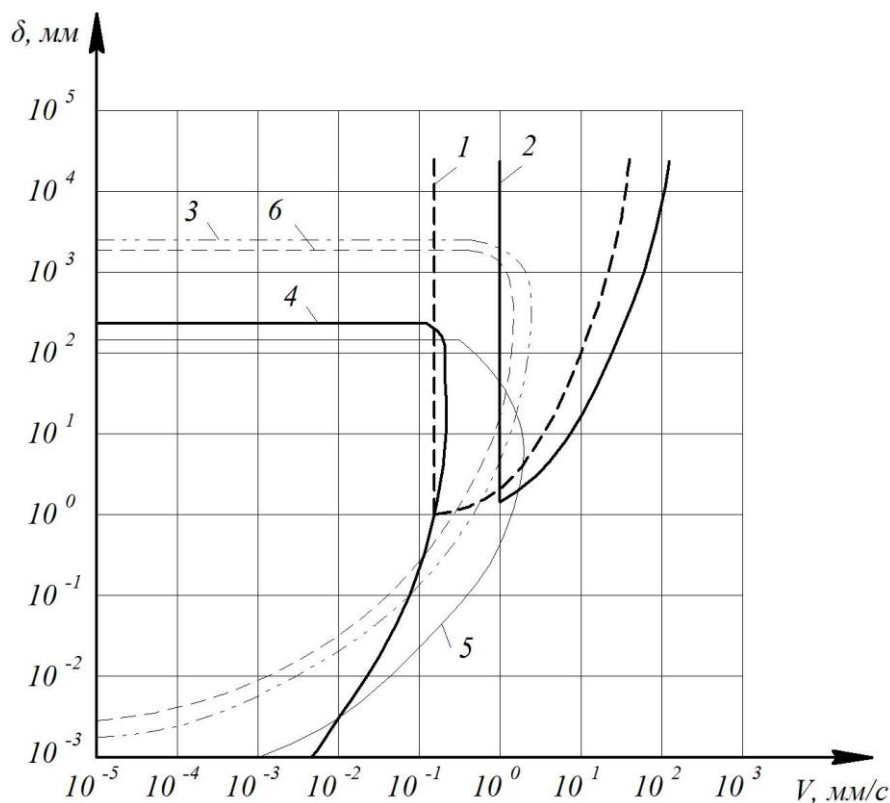


Рисунок 1.6— Диапазоны рабочих перемещений  $\delta$  и скоростей  $V$ , реализуемые непосредственно линейными приводами: 1 - с асинхронными двигателями; 2 - с синхронными двигателями; 3 - с двигателями постоянного тока; 4 - с электромагнитными двигателями; 5 - с электродинамическими двигателями; 6 - с шаговыми двигателями.

1. Приводы с линейными синхронными и асинхронными двигателями, которые предназначены для использования в системах транспортировки на расстоянии более 1 м. Скорость перемещения в таких приводах зависит от конструкции двигателя и частоты питающего напряжения. При использовании напряжения

питания сетевой частоты 50 Гц синхронная скорость движения обычно больше 3 м/с [7; 26; 42].

В линейных асинхронных приводах с частотным управлением диапазон регулирования скорости движения якоря определяется возможностями преобразователей частоты. КПД синхронных и асинхронных двигателей растёт с увеличением скорости, поэтому они используются, в основном, для создания высокоскоростного наземного транспорта. Применение синхронных и асинхронных двигателей в низкоскоростных регулируемых приводах малых перемещений нецелесообразно, так как требует значительных затрат на реализацию частотного управления [45].

2. Приводы с линейными шаговыми двигателями и двигателями постоянного тока. Электроприводы с двигателями постоянного тока, обычно создаются на максимальные перемещения от нескольких сантиметров до нескольких метров. Использование этих двигателей для создания больших перемещений нецелесообразно, так как требует существенных затрат активных материалов, которые располагаются по всей длине рабочего хода. Максимальная скорость перемещения рабочего органа обычно не превышает 10 м/с, так как на малом ходе сложно развить высокие скорости. Линейные шаговые двигатели имеют максимальный рабочий ход до 2-3 м. Они могут иметь шаг до нескольких десятков микрон, с точностью позиционирования до нескольких микрон [41]. Максимальная скорость шаговых двигателей, как правило, меньше 1 м/с. Применение шаговых двигателей и двигателей постоянного тока перспективно в приводах подач малой мощности, графопостроителях, координатографах, робототехнических системах, исполнительных механизмах машин автоматов.

3. Линейные приводы с электромагнитными (ЛЭМД) и электродинамическими (ЛЭДД) двигателями используются для создания перемещений от долей миллиметра до 0,1 - 0,3 м. Максимальная скорость движения якоря ЛЭМД обычно не превышает 0,5 м/с. Благодаря меньшей инерционности подвижных частей, в приводах с электродинамическими двигателями можно получать

большие скорости движения, чем в приводах с ЛЭМД (до 2 м/с). Однако основным недостатком ЛЭДД - наличие обмотки на подвижном якоре, предопределяет низкую надёжность и долговечность данного типа привода при использовании его в ударных машинах[9].

Необходимые представления об амплитудно-частотных характеристиках некоторых из рассмотренных приводов даёт рисунок 1.7.

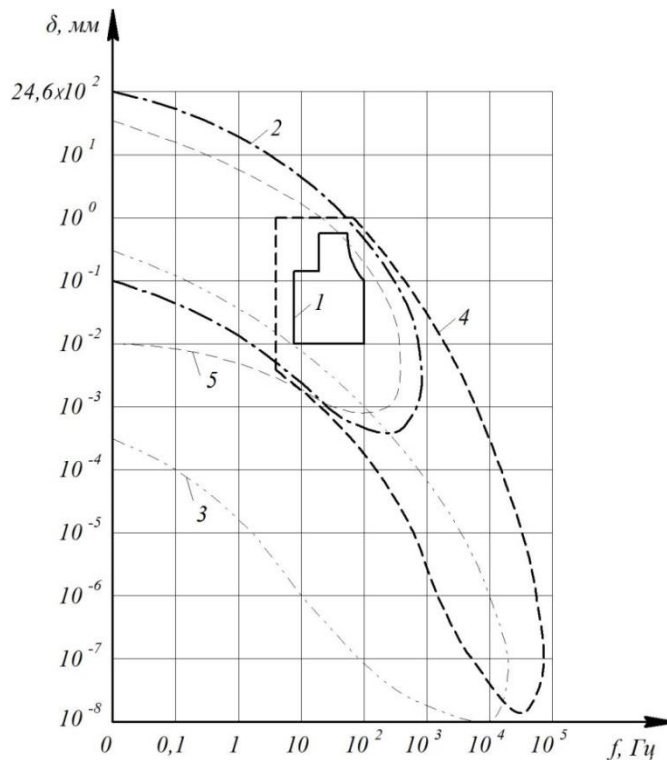


Рисунок 1.7– Амплитудно-частотные характеристики приводов: 1 - электрохимического; 2 - гидронасосного; 3 - гидрообъемного; 4 - электродинамического и индукционно-динамического; 5 – электромагнитного

Каждый из рассмотренных приводов имеет свои особенности, поэтому анализ их технических характеристик обычно не даёт однозначного ответа о том, какой из приводов будет наиболее эффективным в разрабатываемой машине. Следовательно, различные варианты требуется сравнить по какому-то обобщённому критерию, учитывающему основные технические характеристики привода. Одним из таких показателей, характеризующих силовые возможности привода, является удельная сила тяги, представляющая собой отношение максимальной тяговой силы  $F$  привода к его собственной массе  $m$  (таблица 1.2).

Таким образом, среди рассмотренных приводов наиболее эффективным является гидравлический привод с удельной силой тяги  $F/m=10000$  Н/кг.



Таблица 1.2 – Предельные показатели линейных приводов

Тип привода	Частота ходов, Гц	Рабочий ход, мм	Тяговое усилие, Н	КПД, %	Удельная сила тяги, Н/кг
Электромеханический	300	70	45000	65	200
Пневматический	200	$\geq 300$	30000	11	650
Гидравлический	800	$\geq 500$	$\geq 1300000$	85	10000
Электромагнитный	600	2000	150000	80	3000
Электродинамический	15000	300	450000	20	20
Индукционный	200	не ограничен	71500	80	8
Индукционно-динамический	60	50	1530000	50	4000
Магнитоэлектрический	15000	30	1020	60	1
Магнестрикционный	30000	4	612250	65	50
Электрострикционный	15000	10	100	85	500

Однако данный показатель не учитывает совокупность всего технического оснащения, необходимого для осуществления заданного технологического процесса, с применением рассматриваемого типа привода. Ведь здесь для расчётов берётся масса лишь самой рабочей машины, а не всего комплекса агрегатов, обеспечивающих её работу. Поэтому данный показатель следует использовать лишь для сравнения приводов, составляющих единый класс машин с одним и тем же количеством ступеней энергопреобразования. Например, среди рассмотренных линейных электрических двигателей, по удельной силе тяги можно выделить два наиболее мощных из них: ЛЭМД и ЛИДД, из которых наиболее эффективным является ЛЭМД, имеющий больший КПД, равный 80 % (таблица 1.2). Сравнения же принципиально разных типов приводов между собой необходимо производить по общему КПД всей системы энергопреобразования каждого из них.

Проведём сравнительный анализ систем, обслуживающих два наиболее эффективных типа приводов: гидравлический и электромагнитный (ЛЭМД). Главным достоинством гидроцилиндра, по сравнению с ЛЭМД, является его бо-

лее высокий КПД (таблица 1.2). Преобразование энергии в системе, содержащей гидроцилиндр, происходит в соответствии с рисунком 1.8 а.

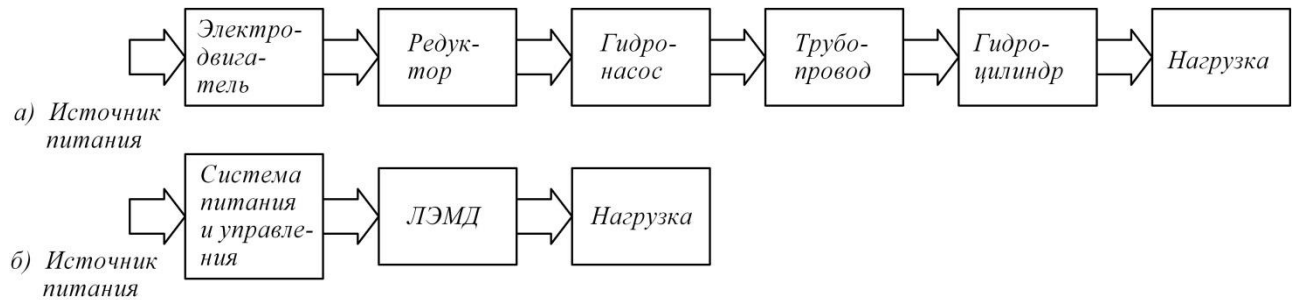


Рисунок 1.8 – Схема энергопреобразования в системе:  
а - с гидроцилиндром; б - с ЛЭМД

При этом общий КПД системы с гидроцилиндром будет:

$$\eta_o^{\Gamma} = \eta_{эд} \cdot \eta_{рд} \cdot \eta_{гн} \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{г},$$

где  $\eta_{эд}$  - КПД электродвигателя (для двигателей переменного тока  $\eta_{эд} \approx 0,93$  [42]);  $\eta_{рд}$  - КПД редуктора (для двухступенчатого редуктора  $\eta_{рд} \approx 0,94$  [43]);  $\eta_{гн}$  - КПД гидронасоса (используемые плунжерные гидронасосы с давлением более 250 атмосфер имеют  $\eta_{гн} \approx 0,76$  [44]);  $\eta_{тр}$  - КПД трубопровода, который для двухпроводной системы с двумя изгибами, давлением 250 атмосфер, диаметром проходного сечения 50-75 мм составляет  $\eta_{тр} \approx 0,85$  [46];  $\eta_{г}$  - КПД гидроцилиндра двойного действия,  $\eta_{г} \approx 0,85$  [47].

Подставляя значения перечисленных величин в (1), получаем:

$$\eta_o^{\Gamma} = 0,93 \cdot 0,94 \cdot 0,76 \cdot 0,85 \cdot 0,85 = 0,48.$$

Таким образом, при достаточно высоком КПД самого гидроцилиндра  $\eta^{\Gamma}$ , общий КПД системы, содержащей его, получается равным  $\eta_o^{\Gamma} \approx 0,48$  из-за многократного преобразования энергии из одного вида в другой.

В соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.8б, происходит преобразование энергии в системе, содержащей ЛЭМД. Общий КПД такой системы  $\eta_o^{\text{эм}}$  будет:

$$\eta_o^{\text{эм}} = \eta_{\text{упу}} \cdot \eta_{\text{эм}}, \quad (1.5)$$

где  $\eta_{\text{упу}}$  - КПД устройства питания и управления молотом, для применяемых тиристорных преобразователей  $\eta_{\text{упу}} = 0,98$  [9];  $\eta_{\text{эм}} = 0,8$  – КПД ЛЭМД [9].

Подставляя значения перечисленных величин в (1.5), получаем

$$\eta_o^{\text{эм}} = 0,98 \cdot 0,8 = 0,784.$$

При меньшем по сравнению с гидроцилиндром собственном КПД линейного электромагнитного двигателя  $\eta_{\text{эм}}$ , общий КПД системы, содержащей ЛЭМД, намного выше КПД системы с гидроприводом, поскольку в ней преобразование энергии происходит непосредственно из электрической в механическую. При этом обеспечиваются простота и высокая надёжность канализации электрической энергии по кабелю по сравнению с гидравлическим шлангом высокого давления, отсутствует дополнительное оборудование в виде электродвигателя, насоса и редуктора.

Применение ЛЭМД для технологических целей при наплавке позволяет решить актуальную проблему машиностроительного производства, связанную с ресурсосбережением и расширением технологических возможностей плазменно-дуговой наплавки для обеспечения высокого качества формообразования и функциональных свойств деталей машин и инструментов многоцелевого назначения за счёт синтеза операции нанесения металла с его обработкой (формообразованием).

Основная причина появления ЛЭМД определяется очевидной тенденцией в развитии машин и механизмов - упростить или исключить преобразователи движения. Это даёт целый ряд преимуществ: упрощение и удешевление устройства, улучшение массогабаритных показателей, повышение надёжности и долговечности. Однако на протяжении последних лет приходится наблюдать так называемый парадокс развития линейных электродвигателей, заключающийся в стремлении использовать их в совокупности с передаточными механизмами, преобразующими параметры механической системы: усилия, перемещения, скорости, ускорения. Такие трансформаторы обеспечивают линейному двигателю

согласованный режим работы с нагрузкой. Их необходимость обусловлена тем, что для различных линейных электродвигателей существуют оптимальные величины начального воздушного зазора, которые при определённой длительности импульса токов обеспечивают максимум КПД энергопреобразования.

При использовании ЛЭМД в качестве привода режущего элемента в процессе безотходного терморезания величина перемещения  $\delta$  якоря двигателя, при которой достигается высокий КПД его работы как преобразователя, меньше необходимого перемещения режущей кромки резца  $\delta_{рез}$ , позволяющего обеспечить условия охлаждения резца. В этом случае механический трансформатор усилий и линейных перемещений, в виде рычажной конструкции резца, обеспечивает преобразователю энергии согласованный режим работы путём изменения соотношений плеч резца. Так, усилие и перемещение режущей кромки резца соответственно можно изменять с учетом следующих зависимостей [48]:

$$F_{рез} = F_{Энач} (R_{и2} / R_{и1}),$$

$$\delta_{рез} = \delta (R_{и1} / R_{и2}),$$

где  $F_{Энач}$  - тяговое усилие якоря ЛЭМД в начальный момент резания;  $R_{и1}$  - расстояние от оси поворота резца до режущей кромки;  $R_{и2}$  - расстояние от оси поворота резца до конечной точки якоря ЛЭМД.

Степень согласования любого импульсного источника механической энергии с нагрузкой, характеризующая эффективность его работы за цикл, может быть выражена общим КПД системы:

$$\eta_{\Sigma} = A_{нг} / A_c,$$

где  $A_{нг}$  - механическая энергия, переданная в нагрузку за цикл;  $A_c$  - энергия источника питания.

Величина  $\eta_{\Sigma}$  зависит как от параметров линейного электродвигателя, так и от параметров нагрузки. Нетрудно видеть, что:

$$\eta_{\Sigma} = \eta \cdot \eta_{мех},$$

где  $\eta = A/A_c$  – КПД энергопреобразования двигателя;  $A$  – механическая энергия, преобразованная двигателем из энергии источника питания;  $\eta_{\text{мех}} = A_{\text{нг}}/A$  – КПД механической системы двигателя и нагрузки.

При анализе работы конкретного линейного электродвигателя можно принять  $\eta = \text{const}$  и об эффективности его работы в системе электропривода судить по частному КПД  $\eta_{\text{мех}}$ , который характеризует эффективность механической системы линейного двигателя и правильность выбора её параметров при заданных параметрах нагрузки.

### **Выводы**

1. Выявлены технологические процессы с высококонцентрированными потоками энергии с использованием импульсной механической энергии.
2. Установлены параметры импульсных технологических процессов.
3. Доказана возможность использования ЛЭМД в составе оборудования для удовлетворения требований импульсных технологий.

## **ГЛАВА 2. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД С ИНТЕГРАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ**

### **2.1 Оптимальные геометрические параметры двухзазорных магнитных систем импульсного ЛЭМД**

Использование в составе силового электромагнитного привода цилиндрических импульсных ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами вызывает необходимость обоснования рациональных размеров двигателей и их конструктивных элементов, разработки методики их расчета.

Выявление рациональных размеров и их соотношений для магнитной системы импульсного ЛЭМД позволит при проектировании таких двигателей обеспечить наилучшие энергетические и динамические показатели приводимых ими машин для импульсных технологий.

Известные положения расчета учитывали соотношения геометрических параметров двигателя без привязки к конфигурации его магнитной системы. Однако к настоящему времени кроме известных магнитных систем появились и новые: двухзазорные магнитные системы цилиндрической структуры с направляющим корпусом, который может быть выполнен как неферромагнитным (НФНК), так и ферромагнитным (ФНК). Эти новые магнитные системы позволяют создавать импульсные ЛЭМД со значительно более высокими удельными энергетическими показателями [49-53].

Цель исследования – установить основные размеры и их соотношения для импульсных ЛЭМД с новыми магнитными системами. В основу расчета этих размеров и их соотношений положено определение величины магнитной энергии, преобразуемой в магнитной системе за цикл в механическую работу [9; 54; 55]. Преобразование магнитной энергии происходит в соответствии с реальным магнитным циклом в координатах «потокосцепление – ток», с учётом продолжительности включения ПВ и температуры  $\tau$  перегрева обмотки возбуждения.

В зависимости от назначения импульсного ЛЭМД и условий его работы

критерии для выбора геометрических размеров могут быть различными: минимумы объема, массы активных материалов, потерь энергии в обмотке, максимумы усилия, быстродействия, магнитной и механической эффективности и др. [9; 56; 57]. Процессы энергопреобразования и показатели рационального использования активных материалов для электромагнитных двигателей определяют их основные энергетические и динамические характеристики при заданных величинах выходных параметров (тяговое усилие, энергия удара, частота ходов). Поэтому в качестве критерия для определения оптимальных соотношений геометрических размеров указанных двигателей целесообразно, как и в работах [9; 51; 54; 58], принять максимум отношения интегральной работы  $A_{\text{и}}$  ЛЭМД к объему его активных материалов  $V_{\text{д}}$ .

Рекомендуемые авторами работ [9; 51; 56] соотношения между основными размерами импульсного ЛЭМД различны. В работах [9; 58], опираясь на выбранный критерий, получены соотношения применительно к указанным ЛЭМД, выраженные через радиус  $r_1$  втяжной части якоря, определены их оптимальные значения ( $x = 1,5 \dots 1,6$ ) и рекомендованы пределы варьирования относительной длины обмотки ( $y = 2 \dots 4$ ). Здесь  $x = r_2 / r_1$ ;  $y = \ell_{\text{к}} / r_1$ ;  $r_2, \ell_{\text{к}}$  – внешний радиус и длина обмотки. В этих работах, однако, рекомендации по выбору длины обмотки противоречивы, а по выбору радиуса якоря – отсутствуют, что затрудняет проектирование и расчет ЛЭМД. Поэтому, сохраняя используемый в [9; 58] подход, проведем обоснование рациональных значений длины обмотки и радиуса якоря ЛЭМД, обеспечивающих при заданном тепловом режиме обмотки наибольшую интегральную работу двигателя при наименьшем объеме его активных материалов. Расчетные конструктивные схемы магнитных систем ЛЭМД приведены на рисунках 2.1, а и б.

При использовании выбранного критерия оценки выразим интегральную работу  $A_{\text{и}}$  импульсного ЛЭМД и объем его активных материалов  $V_{\text{д}}$  через электромагнитные нагрузки и геометрические параметры магнитной системы, принимая те же допущения, что и в работах [51; 54; 58]:

- а) сечение стали вдоль магнитной линии неизменно;
- б) магнитопровод при рабочем зазоре  $\delta = 0$  насыщен, при начальном зазоре  $\delta = \delta_H$  – не насыщен;
- в) режим работы ЛЭМД повторно-кратковременный с относительной продолжительностью включения ПВ, при которой температура обмотки двигателя достигает её заданного превышения  $\tau$ ;
- г) потоки рассеяния при нулевом зазоре отсутствуют;
- д) между обмоткой возбуждения и промышленной сетью включают устройство питания и управления (УПУ), с помощью которого во время движения якоря регулируется ток обмотки, а его эквивалентное значение  $I_\tau$  соответствует допустимому превышению температуры. В результате реализуется магнитный цикл, изображённый на рисунке 2.2, причём  $I_\tau = I_{\text{МАКС}}/k_a$ , где  $k_a$  – коэффициент амплитуды;  $I_{\text{МАКС}}$  – максимальное значение тока обмотки.

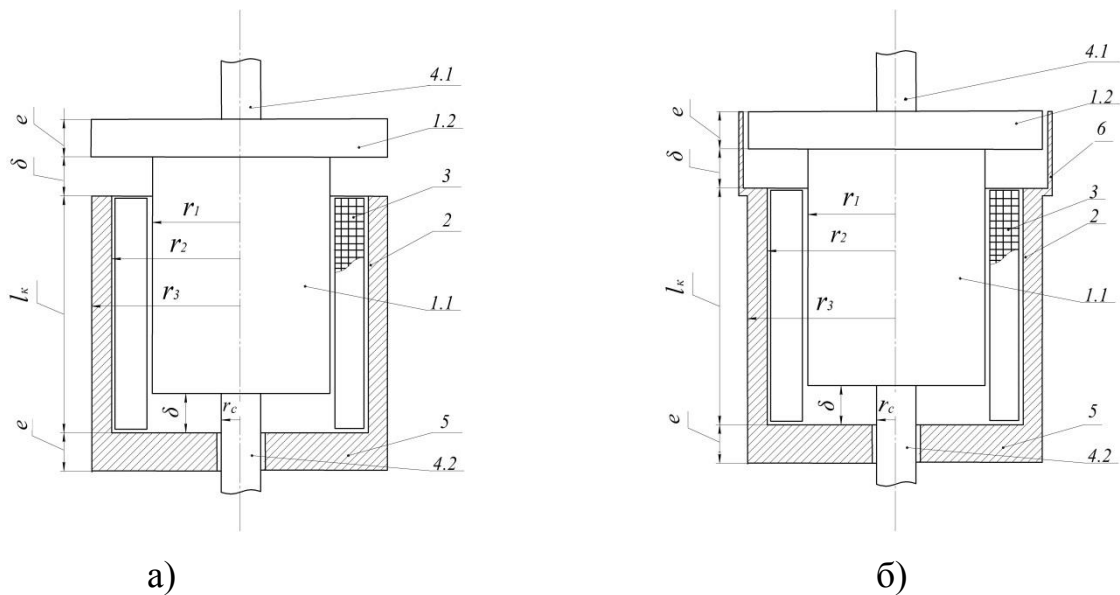


Рисунок 2.1 – Расчётные конструктивные схемы магнитных систем импульсного ЛЭМД с неферромагнитным (а) и ферромагнитным (б) направляющим корпусом: 1 – якорь (1.1 – втяжная часть, 1.2 – притягивающаяся часть); 2 – статор (ярмо); 3 – обмотка возбуждения; 4 – направляющий стержень (4.1 – верхний, 4.2 – нижний); 5 – фланец; 6 – направляющий корпус

Интегральная работа ЛЭМД определяется из его магнитного цикла (Рисунок 2.2):



$$A_{\text{И}} = \Psi_{\tau} \cdot I_{\tau} - \int_0^{\Psi_{\tau}} I d\Psi - 0,5 \Psi_{\text{Н}} \cdot I_{\tau} = \frac{I_{\text{МАКС}} \cdot \Psi_{\tau}}{k_a} \cdot \left[ 1 - \frac{k_a \cdot \int_0^{\Psi_{\tau}} I d\Psi}{\Psi_{\tau} \cdot I_{\text{МАКС}}} \right] - 0,5 \cdot \frac{I_{\text{МАКС}} \cdot \Psi_{\text{Н}}}{k_a}, \quad (2.1)$$

где,  $\Psi_{\tau}, \Psi_{\text{Н}}$  – потокосцепления импульсного ЛЭМД, соответствующие зазорам для рассматриваемых крайних положений якоря и для тока  $I_{\tau}$ .

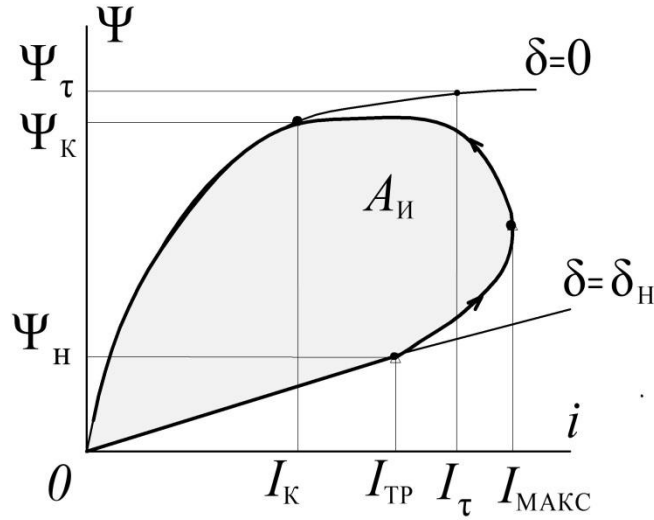


Рисунок 2.2 – Магнитный цикл работы импульсного ЛЭМД

Введем относительные величины согласно [9; 54; 55; 58], приняв за базисные величины радиус  $r_1$  втяжной части якоря (Рисунок 2.1) и значение магнитной индукции  $B_{\text{Б}} = 1$  Тл:

$$B/B_{\text{Б}} = B_*; \quad \Psi/\Psi_{\text{Б}} = \Psi_*; \quad H/H_{\text{Б}} = H_*; \quad I/I_{\text{Б}} = I_*; \quad e/r_1 = e_* \quad \text{и т. д.},$$

где  $B, H$  – значения индукции и напряжённости магнитного поля в магнитопроводе. Тогда (2.1) с учетом этих соотношений примет вид:

$$A_{\text{И}} = \Psi_{\text{Б}} \cdot I_{\tau*} \cdot I_{\text{Б}} \cdot \left[ \Psi_{\tau*} \cdot \left( 1 - \frac{\int_0^{\Psi_{\tau*}} I_* d\Psi_*}{\Psi_{\tau*} \cdot I_{\tau*}} \right) - 0,5 \cdot \Psi_{\text{Н}*} \right],$$

а заменив  $I_{\tau*} = \frac{I_{\text{МАКС}*}}{k_a}$ ;  $\Psi_{\tau*} \approx \Psi_{\text{МАКС}*}$ ;  $B_{\text{К}*} = B_{\tau*}$ ;  $I_{\tau*} = H_{\tau*} = \frac{H_{\text{МАКС}*}}{k_a}$ ,

получим:

$$A_{\text{И}} = \Psi_{\text{Б}} \cdot \frac{I_{\text{МАКС}^*}}{k_a} \cdot I_{\text{Б}} \left[ \Psi_{\tau^*} \left( 1 - \frac{k_a \cdot \int_0^{\Psi_{\tau^*}} I_* d\Psi_*}{\Psi_{\tau^*} \cdot I_{\text{МАКС}^*}} \right) - 0,5 \cdot \Psi_{\text{Н}^*} \right]. \quad (2.2)$$

Выразим входящие в (2.2) базисные и относительные величины через параметры ЛЭМД. Для этого из закона полного тока при зазоре  $\delta = 0$  при одинаковых сечениях якоря и статора получим значение тока  $I = 2\ell_K \cdot H / w = 2y \cdot r_1 \cdot H / w$ . Тогда базисные величины будут

$$\Psi_{\text{Б}} = B_{\text{Б}} \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot w; \quad H_{\text{Б}} = B_{\text{Б}} / \mu_0; \quad I_{\text{Б}} = 2y \cdot r_1 \cdot B_{\text{Б}} / (w \cdot \mu_0), \quad (2.3)$$

где  $w$  – число витков обмотки;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Тогда относительные ток и потокосцепление будут:

$$I_* = H_*, \quad \Psi_* = B_*. \quad (2.4)$$

Представив (2.2) с учетом (2.3), (2.4) и аппроксимируя кривую намагничивания стали полиномом вида  $H = \alpha \cdot B_* + \beta \cdot B_*^5 + \zeta \cdot B_*^9$  [9; 54; 55; 58], получим

$$A_{\text{И}} = 2B_{\text{Б}}^2 \cdot \pi \cdot r_1^3 \cdot y \cdot \mu_0^{-1} \cdot \frac{I_{\text{МАКС}^*}}{k_a} [B_{\tau^*} (1 - q) - 0,5 \Psi_{\text{Н}^*}], \quad (2.5)$$

где  $q = k_a \cdot \left( \int_0^{B_{\tau^*}} H_* dB_* \right) / (B_{\tau^*} \cdot H_{\text{МАКС}^*})$ ;

$$q = \frac{0,5 \cdot k_a (\alpha + \beta \cdot B_{\tau^*}^4 / 3 + \zeta \cdot B_{\tau^*}^8 / 5)}{\alpha + \beta \cdot B_{\tau^*}^4 + \zeta \cdot B_{\tau^*}^8}; \quad (2.6)$$

$B_{\tau^*}, H_{\tau^*} = H_{\text{МАКС}^*} / k_a$  – относительные значения индукции и напряжённости магнитопровода при  $\delta = 0$ , соответствующие току  $I_{\tau^*}$ ;  $\alpha$ ;  $\beta$ ;  $\zeta$  – размерные коэффициенты аппроксимации.

Используя уравнение теплового баланса Ньютона-Рихмана [9; 58], определим допустимый ток с учетом продолжительности включения ПВ:

$$I_{\tau^*} = \sqrt{K_{\text{T}} \cdot k_{\text{ЗМ}} \cdot \tau \cdot S_{\text{ОХЛ}} \cdot S_{\text{ОК}} / (\text{ПВ} \cdot \rho_{\tau} \cdot \ell_{\text{ср}})} / (w \cdot I_{\text{Б}}), \quad (2.7)$$

где  $k_{\text{ЗМ}}$ ,  $K_{\text{T}}$  – коэффициенты заполнения и теплоотдачи (эквивалентный) обмотки;  $S_{\text{ОХЛ}}, S_{\text{ОК}}$  – поверхность охлаждения импульсного ЛЭМД и сечение окна

намотки;  $\rho_\tau$  – удельное сопротивление материала провода при превышении температуры  $\tau$ ;  $\ell_{\text{ср}}$  – средняя длина витка.

Уравнение (2.5) имеет такую же структуру, что и основное расчетное уравнение для других типов электрических машин [59]. Оно позволяет при фиксированных значениях  $B_\tau$ ,  $r_1$ ,  $y$ , ПВ,  $I_\tau$ ,  $\tau$  оценить размеры импульсного ЛЭМД по величине удельной интегральной работы. Выразим  $S_{\text{охл}}$ ,  $S_{\text{ок}}$ ,  $\ell_{\text{ср}}$  через геометрические параметры магнитной системы (Рисунки 2.1а и 2.1 б):

$$S_{\text{охл}} = 2\pi \cdot r_1^2 \cdot \alpha' \cdot [y \cdot (x+1) + x^2 - 1]; S_{\text{ок}} = r_1^2 \cdot y \cdot (x-1); \ell_{\text{ср}} = \pi r_1 \cdot (x+1), \quad (2.8)$$

где  $\alpha'$  – эмпирический коэффициент, учитывающий условия теплоотдачи,  $\alpha' = 0,9 \dots 2,4$  [9; 51]. Тогда выражение (2.5) с учетом (2.3), (2.7) и (2.8) будет иметь окончательный вид:

$$A_{\text{И}} = \pi r_1^{7/2} \cdot y \cdot B_{\text{Б}} \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot [B_{\tau*} \cdot (1-q) - 0,5\Psi_{\text{Н}*}], \quad (2.9)$$

$$\text{где } a_1 = \sqrt{2K_{\text{T}} \cdot k_{\text{ЗМ}} \cdot \tau \cdot \alpha' / (\text{ПВ} \cdot \rho_\tau)}; \quad b_1 = \sqrt{(x-1)[1 + (x-1)/y]}. \quad (2.10)$$

С учетом сечения провода  $S_{\text{пр}} = S_{\text{ок}} \cdot k_{\text{ЗМ}} / w$ , а также выражений (2.7) и (2.8) получим допустимую плотность тока  $j_\tau$  в обмотке возбуждения:

$$j_\tau = a_1 \cdot b_1 / (k_{\text{ЗМ}}(x-1)\sqrt{r_1}) \quad (2.11)$$

и выразим интегральную работу импульсного ЛЭМД через его геометрические параметры и электромагнитные нагрузки

$$A_{\text{И}} = \pi r_1^4 \cdot B_{\text{Б}} \cdot j_\tau \cdot y(x-1) \cdot k_{\text{ЗМ}} [B_{\tau*}(1-q) - 0,5\Psi_{\text{Н}*}]. \quad (2.12)$$

Анализ (2.9) и (2.12) показывает, что интегральная работа в значительной степени определяется радиусом якоря, например, с ростом последнего увеличиваются поверхности взаимодействия и объем рабочих зазоров импульсного ЛЭМД.

Объем активных материалов двигателя [9]:

$$V_{\text{Д}} = \pi r_1^3 \cdot (x_2 + 1)(y + 2e_*). \quad (2.13)$$

Тогда для  $e_* = 0,5$  получим интегральную работу импульсного ЛЭМД на единицу объема в виде критерия оценки  $\Gamma_V$ :

$$\Gamma_V = \frac{A_{\text{И}}}{V_{\text{Д}}} = \frac{\sqrt{r_1} \cdot B_{\text{Б}} \cdot a_1 \cdot (B_{\tau*}(1-q) - 0,5\Psi_{\text{Н}*}) \sqrt{(x-1)(1+(x-1)/y)}}{(x^2+1)(1+1/y)}. \quad (2.14)$$

Для анализа оптимальной геометрии удобно использовать следующее безразмерное выражение удельной интегральной работы

$$\Gamma_V / k' = \sqrt{(x-1)(1+(x-1)/y)} / [(x^2+1)(1+1/y)], \quad (2.15)$$

полученное делением (2.14) на  $k' = \sqrt{r_1} \cdot B_{\text{Б}} \cdot a_1 (B_{\tau*}(1-q) - 0,5\Psi_{\text{Н}*})$

На рисунках 2.3 а и 2.3 б представлены семейства зависимостей (2.15) при  $y = \text{const}$  и при  $x = \text{const}$  соответственно.

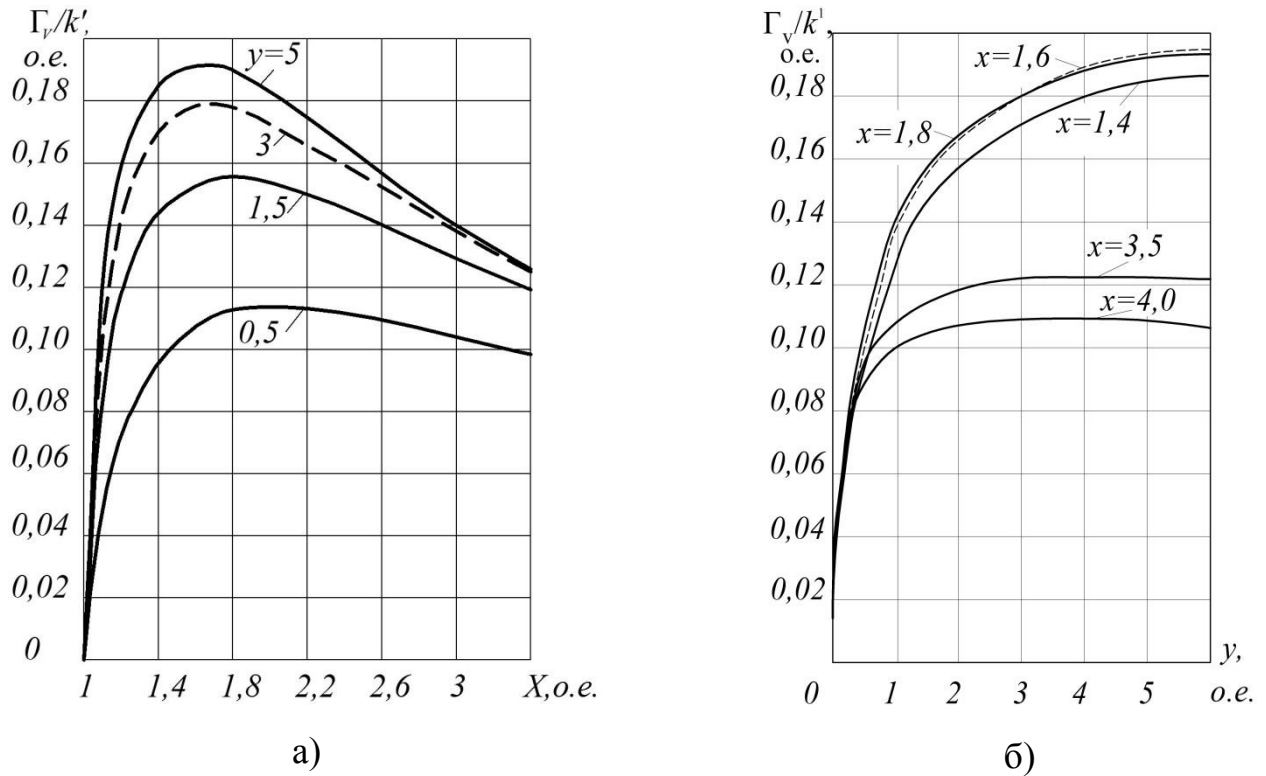


Рисунок 2.3 – Зависимость удельной интегральной работы от отношения радиусов  $x$  якоря и относительной длины  $y$  обмотки при размере фланца  $e_* = 0,5$  при  $y = \text{const}$  (а) и при  $x = \text{const}$  (б)

Анализ (2.15) показывает, что максимум критерия  $\Gamma_V / k'$  при  $r_1 = \text{const}$  соответствует диапазону  $x = 1,6 \dots 1,8$  при  $y = 2 \dots 5$ , что согласуются с [9; 58].

При изменении параметра  $x$  от 1,4 до 3,5 максимум критерия  $\Gamma_V$  относительно длины  $y$  обмотки существует при ее сравнительно больших значениях: с ростом длины обмотки удельная интегральная работа монотонно возрастает, приближаясь к своему пределу, зависящему от параметра  $x$ . Такое изменение критерия  $\Gamma_V(y)$  при  $x = \text{const}$  обусловлено тем, что объем активных материалов в своем росте опережает интегральную работу, а именно: объем  $V_D$  согласно (2.13) растет линейно относительно длины  $y$ , а работа  $A_{II}$  согласно (2.9)...(2.12) – в степени, несколько меньшей единицы. Интенсивность роста удельной интегральной работы в зависимости от  $y$  в диапазоне  $x = 1,4 \dots 3,5$  различна (Рисунок 2.3 б). Для меньших значений  $x$  рост критерия  $\Gamma_V$  существенно замедляется при  $y > 3 \dots 4$ , а для значений  $x$ , близких к 2,5...3,5, – резко замедляется уже при  $y > 1 \dots 1,5$ .

При изменении параметра  $x$  от 3,5 и выше относительно длины  $y$  существуют слабо выраженные максимумы  $\Gamma_V$ , которые с ростом  $x$  проявляются сильнее и смещаются в сторону меньших значений  $y$ . Результаты анализа  $\Gamma_V$  по (2.14) относительно длины обмотки подтверждаются экспериментальными исследованиями, полученными в [60].

Для анализа критерия  $\Gamma_V$  в зависимости от радиуса  $r_1$  представим (2.14) в безразмерной форме. Приняв за аргумент отношение  $r_{1*} = r_1 / r_{1Б}$ , где  $r_{1Б}$  – базисное значение радиуса якоря, используем следующее выражение

$$\frac{\Gamma_V}{k''} = \frac{\sqrt{r_{1*}} \cdot \sqrt{(x-1)(1+(x-1)/y)}}{(x^2+1)(1+1/y)}, \quad (2.16)$$

полученное делением (2.14) на  $k'' = k' / \sqrt{r_1 / r_{1Б}}$ . На рисунке 2.4 представлены зависимости удельной интегральной работы (16) при  $y = \text{const}$  и  $x = 1,5$  [54].

Из анализа рисунка 2.4 следует, что для отношения  $x = 1,5$  удельная интегральная работа увеличивается как с ростом радиуса якоря, так и с ростом длины обмотки. Это означает, что более крупные ЛЭМД обладают лучшими удельными энергетическими показателями, что согласуется с теорией электрических

машин. Интенсивность роста критерия  $\Gamma_V(r_{1*})$  при  $y > 3$  замедляется.

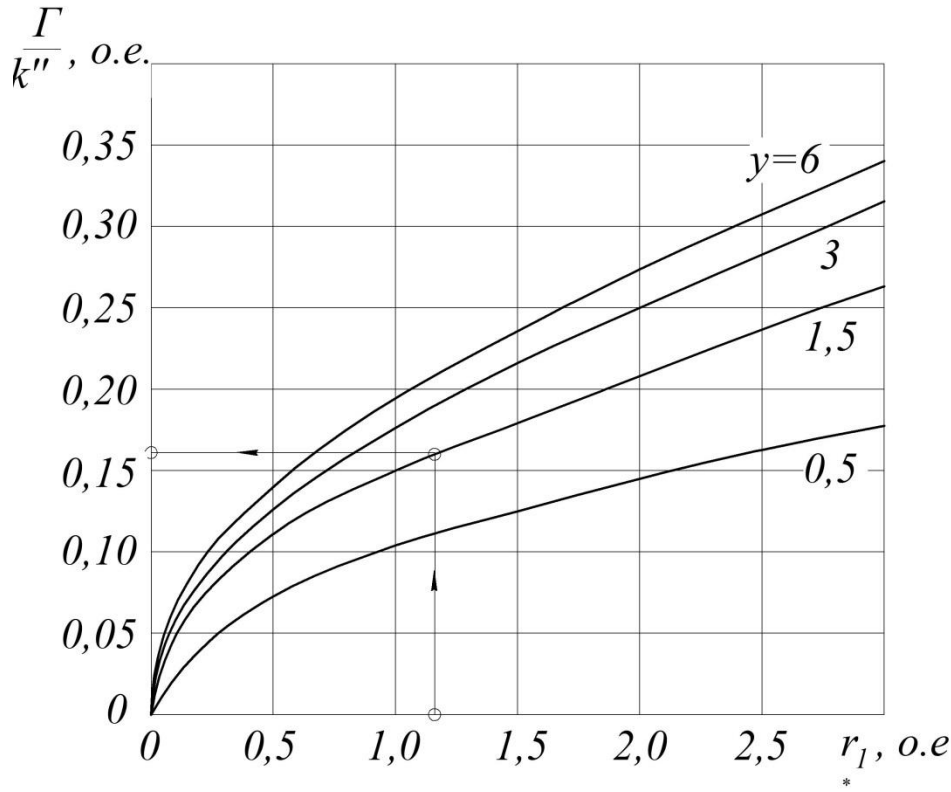


Рисунок 2.4 – Зависимости удельной интегральной работы от относительного радиуса якоря при  $x = 1,5$  о.е. и  $y = \text{const}$

Используя (2.9) или (2.12), определим соответственно базисный размер электромагнитного двигателя:

$$r_1 = \sqrt[7]{\left( \frac{A_{\text{И}}}{\pi \cdot y \cdot B_{\text{Б}} \cdot a_1 \cdot b_1 [B_{\tau^*} \cdot (1 - q) - 0,5 \Psi_{\text{Н}^*}]} \right)^2}, \quad (2.17)$$

$$r_1 = \sqrt[4]{\frac{A_{\text{И}}}{\pi \cdot y \cdot B_{\text{Б}} \cdot j_{\tau} \cdot k_{\text{ЗМ}} (x - 1) [B_{\tau^*} \cdot (1 - q) - 0,5 \Psi_{\text{Н}^*}]}}, \quad (2.18)$$

Как показали исследования, для данного типа импульсных ЛЭМД относительное значение начального потокоцепления  $\Psi_{\text{Н}^*}$  зависит от конструкции магнитной системы, в частности, от материала направляющего корпуса. Так, для импульсного ЛЭМД с НФНК и устройством удержания якоря (УЯ) оно изменяется в диапазоне  $\Psi_{\text{Н}^*} = 0,12 \dots 0,17$  [61; 62], а для импульсного ЛЭМД с ФНК будет выше и составлять ориентировочно  $\Psi_{\text{Н}^*} = 0,4 \dots 0,5$  [55; 62].

Таким образом, критерий  $\Gamma_V$  при указанных оптимальных значениях параметра  $x$  не имеет выраженного оптимума по относительной длине обмотки. Следовательно, пользоваться выражениями (2.17) и (2.18) для нахождения базисного размера радиуса  $r_1$  якоря в отрыве от длины обмотки нельзя из-за их неопределённости. Стремясь избежать этого и учитывая, что интегральная работа задается при проектировании, зафиксируем ее в выбранном критерии  $A_{II} / V_D$ , наложив тем самым на него дополнительное ограничение.

Длина обмотки, определяя максимальный рабочий ход якоря ЛЭМД, входит, как показано выше, в выражения для интегральной работы, поверхности охлаждения и наряду с другими параметрами двигателя обуславливает его тепловой режим. Определим длину обмотки из условия заданных превышения температуры и интегральной работы ЛЭМД при минимальном объеме его активных материалов. Из (2.9) получим

$$y = -\frac{x-1}{2} + \sqrt{\left(\frac{x-1}{2}\right)^2 + \frac{c}{r_1^7(x-1)}}, \quad (2.19)$$

$$\text{где } c = (A_{II} / \pi B_B \cdot a_1 \cdot b_1)^2, \quad b_2 = B_{\tau*} \cdot (1 - q) - 0,5 \Psi_{H*}. \quad (2.20)$$

Подставив выражение (2.19) в формулу для нахождения объема активных материалов двигателя (2.13) для относительного значения размера фланца  $e_* = 0,5$ , получим:

$$V_D = \pi(x^2 + 1) \left( r_1^3 - \frac{x-1}{2} \cdot r_1^3 + \sqrt{r_1^6 \cdot \left(\frac{x-1}{2}\right)^2 + \frac{c}{r_1(x-1)}} \right). \quad (2.21)$$

Исследуем функцию  $V_D$  по выражению (2.21) на минимум, для чего определим производную

$$\frac{\partial V_D}{\partial r_1} = \pi(x^2 + 1) \left[ 3r_1^3 - 3r_1^3 \cdot \left(\frac{x-1}{2}\right) + \frac{6r_1^5 \cdot \left(\frac{x-1}{2}\right)^2 - \frac{c}{r_1^2 \cdot (x-1)}}{2 \cdot \sqrt{r_1^6 \cdot \left(\frac{x-1}{2}\right)^2 + \frac{c}{r_1(x-1)}}} \right]$$

и, приравняв правую часть полученного уравнения к нулю, решим его относи-

тельно радиуса якоря и получим оптимальное значение основного размера:

$$r_{\text{опт}} = \sqrt[7]{c \cdot \frac{3 \cdot (x-2) - (x-1)^2 + \left(1 - \frac{x-1}{2}\right) \sqrt{9 \cdot \left(1 - \frac{x-1}{2}\right)^2 + 7 \cdot \left(\frac{x-1}{2}\right)^2}}{1,5(x-1)^3 \cdot (2-x)}}. \quad (2.22)$$

Тогда с учетом (2.22) оптимальное значение относительной длины по (2.19) примет вид

$$y_{\text{опт}} = \left(\frac{x-1}{2}\right) \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{12-6x}{3(x-2) - (x-1)^2 + \left(1 - \frac{x-1}{2}\right) \cdot \sqrt{9 \cdot \left(1 - \frac{x-1}{2}\right)^2 + 7 \cdot \left(\frac{x-1}{2}\right)^2}}} \right]. \quad (2.23)$$

Для установленных выше рациональных значений параметра  $x$  относительная длина магнитной системы импульсного ЛЭМД, рассчитанная по (2.23), соответствует  $y_{\text{опт}} = 2,96...4,04$  (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Результаты расчета относительной длины обмотки

$x$ , о.е.	1,6	1,7	1,8	1,9
$y_{\text{опт}}$ , о.е.	4,04	3,76	2,96	3,24

С целью экономии обмоточного материала длину обмотки рекомендуется выбирать несколько меньше оптимальных значений, то есть в диапазоне  $y = 2,9...3,3$ .

Следует отметить, что реализованная на практике гамма импульсных ЛЭМД для прессового оборудования рассматриваемого типа согласно [9] имеет относительную длину обмотки, которая варьируется от 2,7 до 3,15.

В результате выражения (2.22) и (2.23) при выше принятых допущениях позволяют для заданных электромагнитных нагрузок, интегральной работы, кривой намагничивания материала магнитопровода и индукции его насыщения, значений  $x$  и других параметров получить оптимальные значения радиуса якоря и длины обмотки, при которых импульсный ЛЭМД будет иметь минимальный объем активных материалов.



Если плотность тока не задана, то приняв для  $b_1$  по (2.10) относительную длину обмотки  $y = 3$ , определим расчетный радиус якоря по формуле (2.17):

$$r_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{A_{\text{и}}}{3\pi B_{\text{в}} \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot b_2}\right)^2}. \quad (2.24)$$

Полученные выражения (2.22)...(2.24) при принятых выше допущениях позволяют получить значения радиуса якоря и длины обмотки, при которых импульсный ЛЭМД будет иметь минимальный объем активных материалов при заданных тепловом режиме и продолжительности включения, что облегчит расчет импульсного ЛЭМД на ранних этапах его проектирования с учетом требуемых параметров импульсных технологий: энергии, силы и частоты воздействий.

## 2.2 Взаимосвязь основных геометрических параметров магнитной системы импульсного ЛЭМД

Отсутствие четко обоснованных рекомендаций по выбору длины обмотки ЛЭМД затрудняет его проектный расчет. В известные выражения для интегральной работы ЛЭМД кроме силы тяги входит длина обмотки, определяя максимальный рабочий ход якоря, величина поверхности охлаждения наряду с другими параметрами двигателя обуславливает его тепловой режим. В [60] были установлены оптимальная относительная длина обмотки и соотношения, связывающие объемы проводниковых материалов и магнитопровода с радиусом якоря и длиной обмотки.

Однако, полученный в [55] критерий  $\Gamma_{\text{в}} = A_{\text{и}}/V_{\text{д}}$  при оптимальных значениях параметра  $x$  не имеет выраженного оптимума по относительной длине обмотки. Следовательно, пользоваться выражениями для нахождения радиуса якоря  $r_1$ , который является базовым геометрическим параметром такого двигателя, затруднительно из-за их неопределенности. Стремясь избежать этого и учитывая, что интегральная работа задается при проектировании, зафиксируем ее в выбранном критерии  $A_{\text{и}}/V_{\text{д}}$ , наложив тем самым на него дополнительное

ограничение.

Установим соотношения между длиной обмотки импульсного ЛЭМД и радиусом якоря при неизменной интегральной работе, для чего воспользуемся формулами (2.19) и (2.17) из п.2.1, представив последнюю в виде:

$$r_1^7 = \frac{c}{(x-1)[y^2 + y(x-1)]}. \quad (2.25)$$

Для удобства анализа представим их в безразмерной форме, приняв за базу значения  $r_1 = r_{1\text{опт}}$  и  $y = y_{1\text{опт}} = 3$ , то есть

$$r_{1*} = r_1 / r_{1\text{опт}}. \quad (2.26)$$

Тогда уравнение (2.25) примет вид:

$$r_{1\text{опт}}^7 = \frac{c}{(x-1)[9 + 3(x-1)]}. \quad (2.27)$$

Разделив (2.25) на последнее выражение и учитывая (2.26), получим в безразмерной форме:

$$y = -(x-1)/2 + \sqrt{(x-1)^2/4 + (6+3x)/r_{1*}^{-7}}. \quad (2.28)$$

На рисунке 2.5 представлены зависимости, построенные по (2.28) и показывающие влияние отклонения относительного радиуса якоря на относительную длину обмотки при неизменной интегральной работе и значениях  $x$ , равных 1,3; 1,6 и 1,9.

Анализ кривых показывает, что длина обмотки ЛЭМД с ростом радиуса якоря нелинейно и монотонно уменьшается, стремясь к нулю. Причем для значений  $r_{1*} < 1$  ( $r_1 < r_{1\text{опт}}$ ) это изменение интенсивнее, чем для  $r_{1*} > 1$ . Например, в диапазоне  $r_{1*} = 0,9...1,0$  относительная длина обмотки изменяется на 47-51%, а в диапазоне  $r_{1*} = 0,8...0,9$  – в 1,52...1,58 раза при изменении параметра  $x$  от 1,3 до 1,9 соответственно.

И, наоборот, при бóльших радиусах якоря, когда  $r_{1*} = 1,0...1,1$ , и тех же значениях  $x$  длина  $y$  изменяется на 30-32%, а для диапазона  $r_{1*} = 1,1...1,2$  – на 28-30%. Разная интенсивность изменения длины обмотки объясняется тем, что

при уменьшении радиуса в первом случае ( $r_1 < r_{1\text{опт}}$ ), длина обмотки растет, как за счет интенсивного уменьшения поперечного сечения стали  $S_C$  импульсного ЛЭМД, так и за счет некоторого увеличения объема его активных материалов, поскольку длина обмотки  $\ell_k$  пропорциональна отношению  $V_d/S_C$ . Во втором случае оба отмеченных фактора действуют противоположно: при увеличении  $r_1$  относительная длина  $y$  уменьшается за счет интенсивного роста  $S_C$  несмотря на то, что объем активных материалов также несколько возрастает. Влияние параметра  $x$  на изменение длины обмотки незначительно. Оно несколько сильнее для бóльших значений  $x$ .

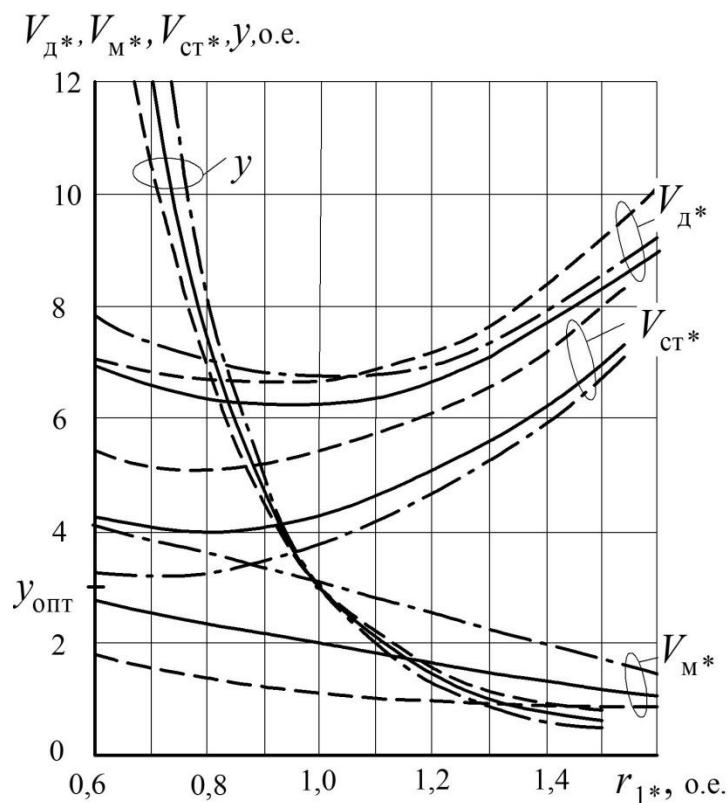


Рисунок 2.5 – Влияние отклонения относительного радиуса якоря на относительные значения объемов ЛЭМД  $V_{д*}$ , обмотки  $V_{м*}$ , магнитопровода  $V_{ст*}$  и его длины  $y$  при  $A_{и} = \text{const}$ ,  $x = \text{const}$  (сплошные –  $x = 1,6$ ; пунктирные –  $x = 1,3$ ; штрихпунктирные –  $x = 1,9$ )

Ранее было установлено, что для импульсных ЛЭМД с заданным значением интегральной работы существует оптимальное значение радиуса якоря, при котором объем активных материалов двигателя минимален. Покажем, как будет

изменяться в этом случае объем двигателя  $V_d$ , а также составляющие его объемы обмотки  $V_m$  и магнитопровода  $V_{ст}$  при отклонении радиуса якоря от его оптимального значения.

Для этого выразим объем, например, обмотки  $V_m = \pi \cdot r_1^3 y(x^2 - 1)$  через безразмерный радиус  $r_{1*}$  по (2.26):

$$V_m = \pi \cdot r_{1*}^3 \cdot r_{\text{лонт}}^3 y(x^2 - 1).$$

С учетом полученных выше соотношений (2.27) и (2.28) представим последнее выражение в виде:

$$V_m = \pi \cdot r_{1*}^3 (x^2 - 1) \left[ \frac{c}{(x-1)(6+3x)} \right]^{3/7} \cdot \left[ -\frac{x-1}{2} + \sqrt{\frac{(x-1)^2}{4} + \frac{6+3x}{r_{1*}^7}} \right], \quad (2.29)$$

а затем, поделив обе части (2.29) на постоянную величину  $\pi \cdot c^{3/7}$ , получим объем обмотки в безразмерной форме:

$$V_{m*} = \frac{r_{1*}^3 (x-1)^{4/7} (x+1) \left[ -\frac{x-1}{2} + \sqrt{\frac{(x-1)^2}{4} + \frac{6+3x}{r_{1*}^7}} \right]}{(6+3x)^{3/7}}. \quad (2.30)$$

Поступая аналогично, получим выражения объемов магнитопровода  $V_{ст*}$  и их суммы  $V_{m*} + V_{ст*} = V_{д*}$ :

$$V_{д*} = \frac{r_{1*}^3 (x^2 + 1) \left[ -\frac{x-1}{2} + \sqrt{\frac{(x-1)^2}{4} + \frac{6+3x}{r_{1*}^7}} + 1 \right]}{[(x-1)(6+3x)]^{3/7}}, \quad (2.31)$$

$$V_{ст*} = \frac{r_{1*}^3 (x^2 - x + 2 + \sqrt{(x-1)^2 + (24+12x)/r_{1*}^7})}{[(x-1)(6+3x)]^{3/7}}. \quad (2.32)$$

Результаты расчета объемов  $V_{m*}$ ,  $V_{ст*}$ ,  $V_{д*}$  при  $x = 1,3$ ;  $1,6$  и  $1,9$  приведены на рисунке 2.5. Анализ его показывает, что в диапазоне отклонений радиуса якоря от его оптимального значения на  $\pm 10\%$  импульсный ЛЭМД в зависимости от указанных значений  $x$  имеет минимальный объем активных материалов, кото-

рый обусловлен характером изменения составляющих  $V_{ст}$  и  $V_M$ . Вне этого диапазона объем двигателя всегда возрастает. Превышение объема  $V_d$  внутри указанного диапазона незначительно и составляет всего 1,5% для  $x = 1,6$ . Так, при увеличении  $r_{1*}$  оно вызвано более интенсивным ростом объема магнитопровода (на 10,5%), нежели уменьшением объема обмотки (на 9%), а при уменьшении радиуса  $r_1$  – наоборот, более интенсивным ростом объема обмотки, нежели уменьшением объема магнитопровода. Меньший объем активных материалов двигателя  $V_d$  соответствует значению  $x = 1,6$ .

Объем обмотки при отклонении радиуса якоря от его оптимального значения в сторону увеличения, а следовательно, при укорочении импульсного ЛЭМД и увеличении его радиальных размеров, падает. Это объясняется уменьшением площади окна намотки за счет уменьшения согласно (2.31) длины обмотки в большей степени, нежели пропорционального увеличения радиального размера  $(r_2 - r_1)$ , который является высотой окна намотки. При этом одновременно растет и средняя длина витка намотки, что нецелесообразно. Наибольшая интенсивность уменьшения  $V_M$  соответствует значению  $x = 1,9$ , наименьшая –  $x = 1,3$ . Ему также соответствует и меньший объем обмотки. При отклонении радиуса якоря от его оптимума в сторону уменьшения объем обмотки, наоборот, растет из-за увеличения площади окна намотки за счет роста длины  $y$  в большей степени, чем за счет уменьшения радиального размера  $r_2 - r_1$ . Отклонение радиуса якоря от оптимума на  $\pm 10\%$  вызывает изменение объема обмотки для  $x = 1,6$  на 16%. Меньшим значениям  $x$  соответствуют и меньшие значения объема обмотки из-за сокращения размера  $r_2 - r_1$ .

Характер изменения объема магнитопровода при изменении радиуса якоря несколько иной, чем у объема  $V_M$ . Объем магнитопровода  $V_{ст}$  в диапазоне  $r_{1*} = 0,7 \dots 0,8$ , то есть для более "длинных" ЛЭМД, имеет слабо выраженный минимум. Для диапазона  $r_{1*} = 0,8 \dots 0,9$  наблюдается рост объема, занимаемого магнитопроводом, для всех значений  $x$ . В случае  $r_{1*} < 0,7$  длина обмотки возрастает, что вызывает также рост длины средней магнитной линии и объема магнитопро-

вода. Для  $r_{1*} > 0,9$  объем  $V_{СТ}$  также растет за счет увеличения радиальных размеров двигателя несмотря на уменьшение длины  $y$ . Меньший объем магнитопровода соответствует большим значениям параметра  $x$ .

Приведенный анализ позволил установить для заданной при проектировании интегральной работы соотношения между основными размерами импульсного ЛЭМД. Они позволяют найти оптимальные значения радиуса якоря и длины обмотки, которые, являясь базисными геометрическими параметрами [54; 62; 63] электромагнитного двигателя, обеспечивают минимальный объем активных материалов двигателя при заданном тепловом режиме. С целью уменьшения стоимости проводниковых материалов параметр  $x$  выбирают несколько меньше установленного, например,  $x = 1,5 \dots 1,6$ , а радиус якоря – несколько больше расчетного. Например, согласно рисунку 1 увеличение радиуса на 5% снижает объем обмотки на 4,5%.

Таким образом, при заданных интегральной работе и превышении температуры обмотки, исходя из минимума объема активных материалов, определены рациональные геометрические размеры импульсных линейных электромагнитных двигателей с двумя рабочими зазорами и ферромагнитным направляющим корпусом. Установлены оптимальная относительная длина обмотки и соотношения, связывающие объемы проводниковых материалов и магнитопровода, с радиусом якоря и длиной обмотки. При относительной длине  $y = 3$  найден оптимальный базисный геометрический параметр – радиус якоря, что позволяет начать проектный расчет ЛЭМД.

## **2.3 Импульсные ЛЭМД с укороченными магнитными системами**

### **2.3.1 Влияние укорочения магнитной системы на статические характеристики ЛЭМД с продольным магнитным полем**

Благодаря конструктивной простоте и надежности, высоким удельным показателям и эффективности импульсные ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими воздушными зазорами используются в составе электромагнит-

ного привода прессов, пресс-молотов и других ударных машин [9]. Одним из путей совершенствования таких ЛЭМД за счет дальнейшего повышения их удельных показателей является укорочение магнитной системы ЛЭМД, в результате чего увеличивается степень неоднородности магнитного поля рабочих зазоров, что может стать предпосылкой роста удельных силовых показателей [30; 64; 65]. При неизменном объеме активных материалов  $V_d$  это позволит увеличить размеры двигателя в радиальном направлении, а также поверхность якоря, взаимодействующую со статором, и, следовательно, повысить удельное тяговое усилие в конце рабочего хода  $F_{к*} = F_k / V_d$ . Данное выражение в дальнейшем используем как критерий сравнения импульсных ЛЭМД, имеющих базисную и укороченную магнитные системы.

Определим, как изменится тяговое усилие в конце рабочего хода импульсного ЛЭМД в случае укорочения его магнитной системы. Пренебрегая потоками рассеяния и используя формулу Максвелла, определим тяговое усилие импульсного ЛЭМД для двух рабочих зазоров [56; 66-69]:

$$F = B^2 \cdot \pi \cdot r_2^2 / \mu_0 . \quad (2.33)$$

Усилие  $F_k$  в конце рабочего хода определится значением магнитной индукции  $B_k$ , тогда (2.33) примет вид

$$F = B_k^2 \cdot \pi \cdot r_2^2 / \mu_0 . \quad (2.34)$$

Примем у сравниваемых двигателей величину конечной индукции  $B_k$  одинаковой. Тогда для базисного ЛЭМД с конструктивными параметрами  $r_1 = r_{1Б}$  и  $y = y_B = 3$  значение тягового усилия  $F_{кБ}$  в конце рабочего хода будет

$$F = B_k^2 \cdot \pi \cdot r_{1Б}^2 / \mu_0 . \quad (2.35)$$

Поделив (2.34) на (2.35), получим зависимость относительного тягового усилия  $F_{к*}$  в конце рабочего хода импульсного ЛЭМД от относительного радиуса  $r_{1*} = r_1 / r_{1Б}$  якоря в виде:

$$F_{к*} = r_{1*}^2 \quad (2.36)$$

Для импульсных ЛЭМД с варьируемыми в сторону укорочения длинами магнитной системы, выраженными через относительную длину обмотки  $y$ , при-

мом неизменными значения объема их активных материалов  $V_d$ . Он определяется выражением (2.13):

$$V_d = \pi \cdot r_1^3 (x^2 + 1) \cdot (y + 2e_*),$$

откуда для укороченной магнитной системы с длиной  $y = y_K$  для базисной системы с длиной  $y = y_B = 3$  при  $e_* = 0,5$  выразим радиусы якоря  $r_{1K}$  и  $r_{1B}$ , соответственно получим:

$$r_{1K} = \sqrt[3]{\frac{V_d}{\pi \cdot (x^2 + 1) \cdot (y_K + 1)}}, \quad r_{1B} = \sqrt[3]{\frac{V_d}{\pi \cdot (x^2 + 1) \cdot (y_B + 1)}} \quad (2.37)$$

Тогда относительный радиус якоря  $r_{1*} = r_{1K} / r_{1B}$  в случае укорочения магнитной системы ЛЭМД с учетом (2.37) и для  $y = y_B = 3$  равен:

$$r_{1*} = \sqrt[3]{\frac{4}{y_K + 1}}. \quad (2.38)$$

Определим теперь по выражению (2.36) усилие  $F_{K*}$  импульсного ЛЭМД в случае укорочения его магнитной системы и при условии  $V_d = \text{const}$ :

$$F_{K*} = \sqrt[3]{\frac{16}{(y_K + 1)^2}}. \quad (2.39)$$

На рисунке 2.6 представлена зависимость  $F_{K*}(y_K)$ , построенная по выражению (2.39).

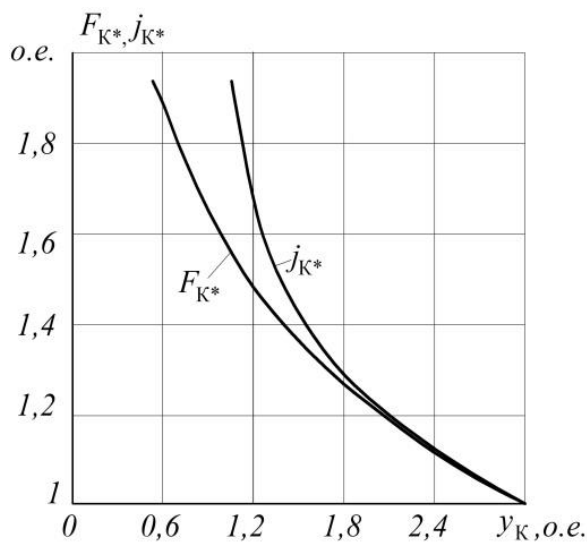


Рисунок 2.6 – Зависимости относительных конечного тягового усилия  $F_{K*}$  и плотности тока  $j_{K*}$  в обмотке от длины магнитной системы  $y_K$  при ее укорочении



Ее анализ показывает, что усилие  $F_{к*}$  в конце рабочего хода ЛЭМД в случае укорочения его магнитной системы возрастает и ограничено величиной, равной  $F_{к*}=2,52$ , когда длина обмотки  $y$  стремится к нулю. Однако при этом объем обмотки также стремится к нулю, вследствие чего плотность тока в ней возрастает до бесконечности.

Совместная оценка изменения усилия  $F_{к*}$  и плотности тока  $j_{к*}$  в зависимости от относительной длины  $y_k$  при укорочении магнитной системы и сохранении объема  $V_d$  позволит выбрать рациональные значения длины  $y_k$ . Поэтому при тех же условиях выразим относительную плотность тока при укорочении магнитной системы  $j_{к*}=j_k/j_b$ , где  $j_b$  - плотность тока в обмотке ЛЭМД с длиной  $y = y_b$ . Для одной и той же МДС  $w \cdot I$  представим плотности тока (соответственно для базисной и "короткой" магнитных систем) через коэффициент заполнения обмотки  $k_{зм}$  и сечения окна намотки из (2.8)  $S_{ОКБ}$ ,  $S_{ОКК}$  [9; 54; 55; 70]:

$$j_b = \frac{w \cdot I}{S_{ОКБ} \cdot k_{зм}} \quad , \quad j_k = \frac{w \cdot I}{S_{ОКК} \cdot k_{зм}} \quad ,$$

откуда получим плотность тока при «укорочении»:

$$j_{к*} = 3 / \left( y_k \cdot \sqrt[3]{\frac{16}{(y_k + 1)^2}} \right). \quad (2.40)$$

На рисунке 2.6 также представлена зависимость плотности  $j_{к*}(y_k)$ , построенная по выражению (2.40). Сравнение графиков  $F_{к*}$  и  $j_{к*}$  показывает, что для длины  $y_k \leq 1,4 \dots 1,6$  интенсивность роста относительной плотности тока в обмотке ЛЭМД начинает существенно превышать интенсивность роста относительного усилия  $F_{к*}$  в конце рабочего хода двигателя. Если, например, для  $y=2$  значения  $j_{к*}$  и  $F_{к*}$  равны 1,24 и 1,21, то для  $y=1,5$  они будут 1,46 и 1,37 соответственно. Дальнейшее укорочение магнитной системы ЛЭМД будет сопровождаться еще более значительным ростом потерь в его обмотке и поэтому нецелесообразно.

С целью детального сравнения импульсных ЛЭМД, имеющих одинаковые объемы активных материалов, и выяснения влияния укорочения магнитной си-

системы двигателя на его интегральную работу и тяговое усилие используем и сопоставим результаты, полученные теоретическим путем, с результатом проведенного математического моделирования и экспериментального исследования статических тяговых характеристик сравниваемых двигателей. Для этого были спроектированы и изготовлены две пары образцов ЛЭМД с длинами магнитных систем и обмоток, отличающимися в два раза.

Два двигателя (базисные) соответствовали импульсным ЛЭМД типа ПЭМ-0,3 и ПЭМ-0,8 [9] и имели относительную длину обмотки, равную ее оптимальному значению  $y=3$  [54; 55]. Другие два ("короткие") были разработаны нами и соответствовали импульсным ЛЭМД прессов ПЭМ-0,3К и ПЭМ-0,8К с укороченной магнитной системой и длиной  $y=1,5$ . Пары импульсных ЛЭМД прессов ПЭМ-0,3 и ПЭМ-0,3К, а также ПЭМ-0,8 и ПЭМ-0,8К имели одинаковые геометрические соотношения и объемы активных материалов. Магнитопроводы всех двигателей выполнены из стали одной партии, обмотки имеют одинаковое число витков. В таблице 2.2 приведены основные конструктивные параметры сравниваемых ЛЭМД.

Таблица 2.2– Основные конструктивные параметры ЛЭМД с одинаковым объемом активных материалов и различной длиной магнитной системы

Параметры ЛЭМД	Сравниваемые ЛЭМД при $\delta_*= \delta/l_k=0,43$			
	ПЭМ-0,3 базисный	ПЭМ-0,3К «короткий»	ПЭМ-0,8 базисный	ПЭМ-0,8К «короткий»
Радиус якоря $r_1$ , мм	24	28	31	37
Длина обмотки $l_k$ , мм	72( $y=3$ )	42( $y=1,5$ )	93( $y=3$ )	56( $y=1,5$ )
Внешн. радиус обмотки $r_2$ , мм	35( $x=1,46$ )	42( $x=1,50$ )	46,5( $x=1,50$ )	56,5( $x=1,53$ )
Наружн. радиус статора $r_3$ , мм	42	50	55	67
Высота стопа $h$ , мм	15	9	18	11
Размер фланца $e$ , мм	12	14	15,5	18,5
Число витков обмотки $w$	325	325	325	325
Объем активных материалов $V_d \cdot 10^5$ , мм <sup>3</sup>	5,44	5,61 (103%)	12,2	12,9(106%)
Масса двигателя $m_d$ , кг	3,81	3,95	8,46	9,03
Масса обмотки $m_m$ , кг	0,77	0,62	1,68	1,47
Удельное усилие $F_k/m_d$ , Н/кг	879	1300	787	1196

Снятие статических тяговых характеристик и их обработка проводились по методике работы [9]. Математическое моделирование проводилось методом конечных элементов с помощью программного комплекса Elcut [71; 72].

В качестве примера в таблице 2.3 представлены статические характеристики двигателя типа ПЭМ-0,8К, полученные как при моделировании [73; 74], так и экспериментально, а на рисунке 2.7 представлена картина его поля для рабочего зазора  $\delta = 10,2$  мм. Статические характеристики, полученные в результате моделирования и эксперимента, отличаются не более чем на 5...8%.

Таблица 2.3 – Статические тяговые характеристики  $F=f(\delta; I)$  двигателя пресса ПЭМ-0,8К

За- зор, мм	$I=10$ А		$I=20$ А		$I=30$ А	
	моделирова- ние	экспери- мент	моделирова- ние	экспери- мент	моделирова- ние	экспери- мент
1,3	5504,10	5975,0	8942,50	9632,0	11217,00	11215,0
2,0	3244,20	3291,0	7041,10	7404,0	9237,60	9006,0
2,5	2020,00	1940,0	5967,80	6062,0	8170,30	7624,0
3,8	967,00	909,0	3821,00	3940,0	6074,20	6105,0
4,3	869,75	811,0	3240,10	3334,0	5510,30	5369,0
5,8	521,53	506,0	1996,20	2100,0	3990,00	3897,0
6,3	465,60	432,0	1765,60	1645,0	3642,10	3464,0
8,2	311,66	300,0	1153,90	1212,0	2500,10	2468,0
9,5	249,22	231,0	908,39	866,0	1982,20	1949,0
10,2	232,78	219,0	830,00	773,0	1801,50	1728,0
12,0	185,42	171,0	642,18	593,0	1383,90	1290,0
14,0	155,19	145,0	519,84	483,0	1112,50	1053,0
19,8	105,69	101,0	318,91	299,0	661,41	620,0

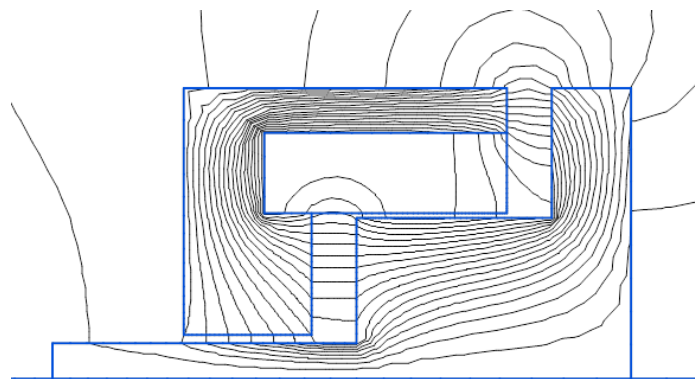


Рисунок 2.7 – Картина поля модели импульсного ЛЭМД

пресса ПЭМ-0,8К при зазоре  $\delta=10,2$  мм

Дальнейшее сравнение двигателей выполнялось на основе экспериментальных характеристик. На рисунке 2.8 и рисунке 2.9 приведены статические тяговые характеристики исследуемых ЛЭМД, позволяющие провести их сравнение по начальному  $F_H$  и конечному  $F_K$  тяговым усилиям.

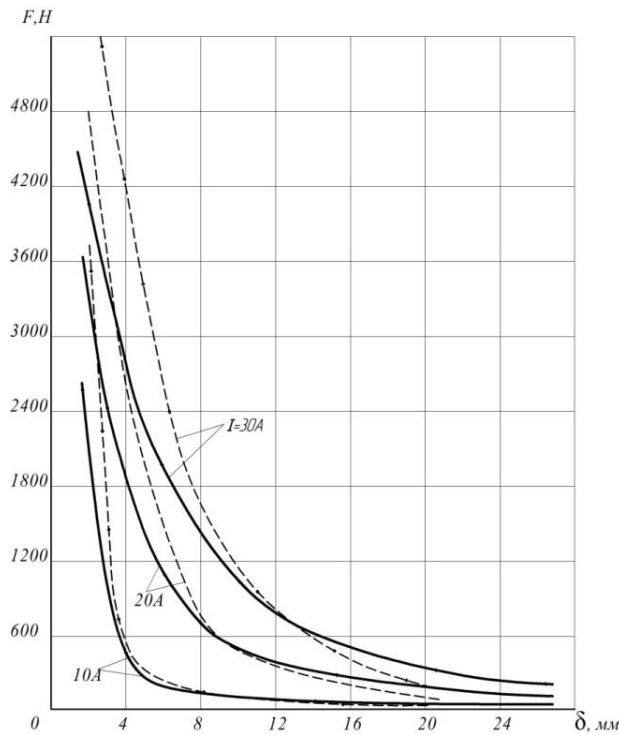


Рисунок 2.8 – Статические тяговые характеристики ЛЭМД ПЭМ-0,3 и ПЭМ-0,3К с одинаковым объемом активных материалов: сплошные линии – базисный ЛЭМД ПЭМ-0,3 ( $\gamma=3$ ;  $V_d=5,44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ ); пунктирные линии – ЛЭМД ПЭМ-0,3К ( $\gamma=1,5$ ;  $V_d=5,61 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ )

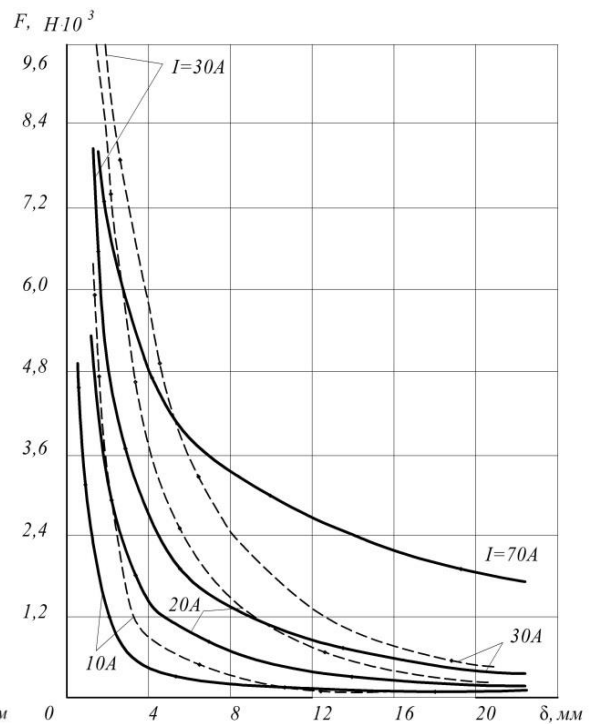


Рисунок 2.9 – Статические тяговые характеристики ЛЭМД ПЭМ-0,8 и ПЭМ-0,8К с одинаковым объемом активных материалов: сплошные линии – базисный ЛЭМД ПЭМ-0,8 ( $\gamma=3$ ;  $V_d=1,22 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ); пунктирные линии – ЛЭМД ПЭМ-0,8К ( $\gamma=1,5$ ;  $V_d=1,29 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ )

Далее сравнение проведем по зависимостям интегральной работы  $A_{\text{и}}$  ЛЭМД от рабочего зазора  $\delta$  согласно методике [9]. В качестве примера на рисунке 2.10 представлены указанные зависимости для ЛЭМД прессов ПЭМ-0,3 и ПЭМ-0,3К.

Поскольку исследуемые двигатели имеют различную длину обмотки, которая определяет и различный рабочий ход якоря, то сравнение выполнено для двух случаев.

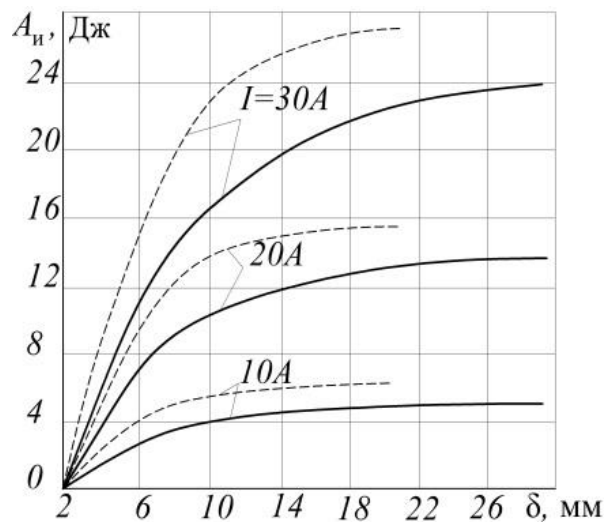


Рисунок 2.10 – Зависимости интегральной работы  $A_{и}$  от рабочего зазора  $\delta$  импульсных ЛЭМД прессов ПЭМ-0,3 (сплошные линии) и ПЭМ-0,3К (пунктирные линии)

Во-первых, для одинакового относительного рабочего хода, равного  $\delta_* = \delta/l_k = 0,43$  для ЛЭМД прессов ПЭМ-0,3 и ПЭМ-0,3К и  $\delta_* = 0,25$  для ЛЭМД прессов ПЭМ-0,8 и ПЭМ-0,8К. Во-вторых, для одинакового абсолютного рабочего хода, равного 0,018м для ЛЭМД прессов ПЭМ-0,3 и ПЭМ-0,3К и 0,023м для ЛЭМД прессов ПЭМ-0,8 и ПЭМ-0,8К. Результаты сравнения приведены на рисунке 2.11 и рисунке 2.12.

Сравнение экспериментальных тяговых характеристик показало, что в первом случае двигатели прессов ПЭМ-0,3К и ПЭМ-0,8К с укороченной магнитной системой и длиной обмотки  $y=1,5$  превосходят базисные ЛЭМД по интегральной работе соответственно на 4% и 11%, по начальному тяговому усилию – на 16% и 42%, по конечному тяговому усилию – на 53% и 62%. Превышение по начальному тяговому усилию более выражено для меньших значений  $\delta$ . Так, для ЛЭМД пресса ПЭМ-0,3К это превышение объясняется снижением тягового усилия у базисного ЛЭМД вследствие значительного по условию эксперимента рабочего зазора, равного 0,033м, при рабочем ходе 0,031м. Тогда как у "короткого" ЛЭМД рабочий ход был равен 0,018м. Превышение по начальному тяговому усилию для ЛЭМД пресса ПЭМ-0,8К объясняется не столько отмеченной выше причиной, сколько еще меньшим рабочим зазором "короткого" ЛЭМД, равным

0,014м. Превышение тягового усилия по его конечному значению вызвано значительным ростом  $F_K$  у ЛЭМД с укороченной магнитной системой по сравнению с усилием  $F_K$  у базисных ЛЭМД вследствие более раннего насыщения их магнитопроводов.

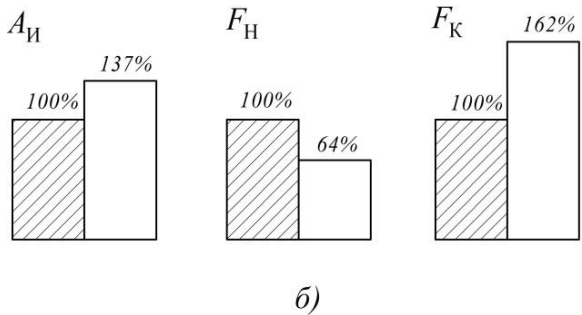
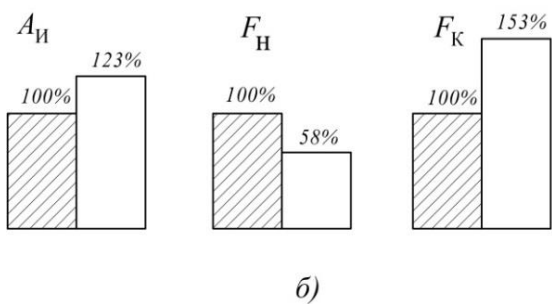
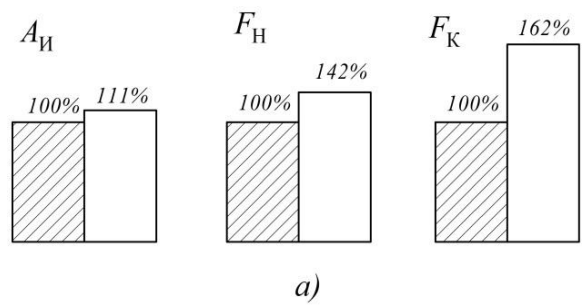
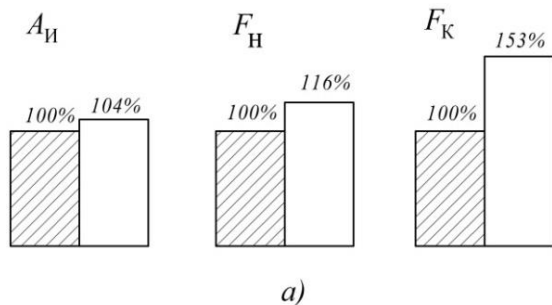


Рисунок 2.11 – Диаграммы силовых и энергетических показателей импульсных ЛЭМД прессов ПЭМ-0,3 (заштрихованы) и ПЭМ-0,3К (не заштрихованы): а) при относительном рабочем ходе  $\delta^*=0,43$ ; б) при абсолютном рабочем ходе  $\delta=0,018$  м

Рисунок 2.12 – Диаграммы силовых и энергетических показателей импульсных ЛЭМД прессов ПЭМ-0,8 (заштрихованы) и ПЭМ-0,8К (не заштрихованы): а) при относительном рабочем ходе  $\delta^*=0,25$ ; б) при абсолютном рабочем ходе  $\delta=0,023$  м

Оценку изменения интегральной работы в данном случае произведем с использованием расчетных формул. На основании зависимостей  $\Gamma\sqrt{k''}$ , полученных по выражению (2.16) для  $x=1,5$ , определяем значение этого критерия для относительного радиуса  $r_{1*}$ , соответствующего, например, двигателю пресса ПЭМ-0,3К: для  $y=1,5$  и  $r_{1*}=28/24=1,17$  из рисунка 2.4 находим  $\Gamma\sqrt{k''}=0,164$ . Тогда как для базисного ЛЭМД с  $r_{1*}=1$  и  $y=3$  согласно этому же рисунку критерий  $\Gamma\sqrt{k''}$  на 6,7% больше и равен 0,175. Таким образом, при неизменном объеме  $V_d$ , и других параметрах двигатель пресса ПЭМ-0,3К должен иметь меньшую на 6,3% интегральную работу.

Однако для рассматриваемого случая величина  $A_{\text{и}}$  для ЛЭМД пресса ПЭМ-0,3К, полученная из эксперимента, оказалась больше расчетного значения на 10,3%. Это объясняется неучетом потоков рассеяния, которые создают дополнительную составляющую тягового усилия и бóльшим на 3,1% (Таблица 2.2) объемом  $V_{\text{д}}$  у ЛЭМД с укороченной магнитной системой по сравнению с базисным.

Во втором случае, когда двигатели имели одинаковый абсолютный рабочий ход, эксперимент показал, что ЛЭМД с укороченной магнитной системой также превосходят соответствующие базисные по величине интегральной работы на 23% и 37% , по конечному тяговому усилию – на 53% и 62% , но уступают по величине начального тягового усилия на 42% и 36%. Увеличение интегральной работы обусловлено тем, что она при малых ходах якоря зависит в основном от приращения тягового усилия в конце рабочего хода, которое, как известно, значительно больше для "короткого", нежели для базисного ЛЭМД. Последний же "не добирает" интегральную работу из-за уменьшения хода. Снижение усилия  $F_{\text{н}}$  у ЛЭМД с укороченной магнитной системой объясняется тем, что вклад потоков рассеяния в создание тягового усилия у таких ЛЭМД меньше. В других случаях "короткие" ЛЭМД более полно обеспечат технологические требования, когда при выполнении операций, например, завальцовки, требуется значительное статическое, а не ударное усилие, под действием которого металл заготовки может "рваться" и возникает брак.

Импульсные ЛЭМД продольного магнитного поля одинакового объема с укороченной магнитной системой и длиной обмотки  $y=1,5$  эффективнее базисных ЛЭМД с длиной  $y=3$  по удельным силовым показателям на относительно коротких ходах якоря, когда  $\delta < 0,4/l_{\text{к}}$ . Так, удельное тяговое усилие для предложенных ЛЭМД с укороченной магнитной системой возросло с 0,8...0,9 до 1,2...1,4 кН/кг. Применение ЛЭМД с укороченной магнитной системой в этом случае позволит при заданных значениях тягового усилия в конце рабочего хода снизить массу и добиться экономии активных материалов до 50% [75].

### 2.3.2 Влияние укорочения магнитной системы на статические характеристики ЛЭМД с поперечным магнитным полем

Исследование различных типов магнитных систем показало, что тяговую характеристику импульсного ЛЭМД, имеющую схожий вид с механической характеристикой привода резца для технологического процесса, например, терморезания, можно получить лишь у импульсных ЛЭМД с продольно-поперечным и поперечным магнитным полем [32].

Оценим изменение статических характеристик импульсного ЛЭМД с поперечным магнитным полем при укорочении его магнитной системы и сохранении неизменным объема активных материалов двигателя. В качестве базисного взят импульсный ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем (Рисунок 2.13), магнитная система которого выполнена из конструкционной стали марки Ст.3. Такой двигатель имеет известные экспериментальные тяговые статические характеристики [32; 76].

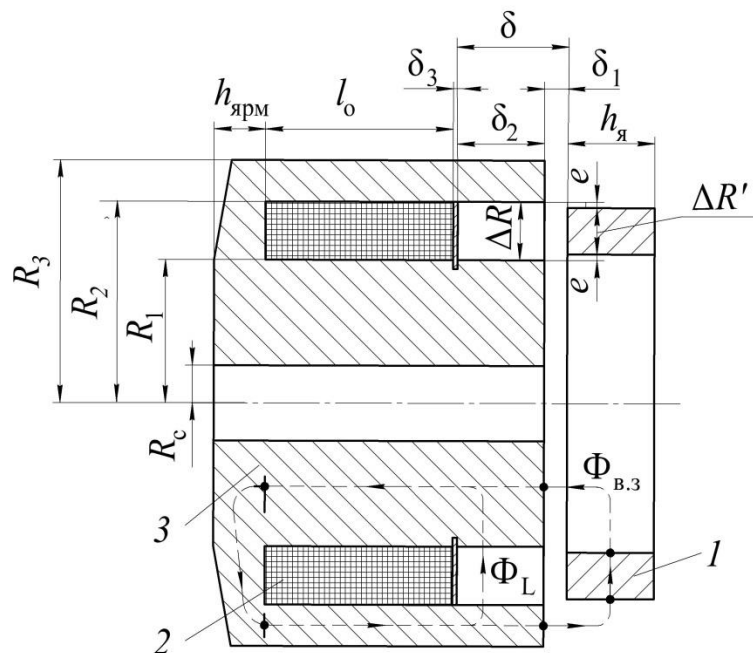


Рисунок 2.13 – Конструктивная схема магнитной системы импульсного ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем: 1 – якорь; 2 – обмотка возбуждения; 3 – статор (ядро);  $R_1$ ,  $R_2$  – внутренний и внешний радиусы обмотки возбуждения;  $R_3$  – внешний радиус статора;  $R_c$  – радиус отверстия под направляющий стержень якоря;  $l_0$  – длина обмотки;  $\delta$  – рабочий зазор ( $\delta = \delta_1 + \delta_2$ );  $h_{я,рм}$  и  $h_{я}$  – высоты ядра и кольцеобразного якоря;  $\delta_3$ ,  $e$  – технологические зазоры;  $\Phi_{B.3}$  – магнитный поток воздушного зазора;  $\Phi_L$  – радиальный магнитный поток рассеяния



Укороченная конструкция магнитной системы имеет осевые размеры, уменьшенные в 1,5 раза по сравнению с базисной конструкцией при сохранении неизменным объема  $V_d$  активных материалов двигателя.

В качестве метода исследования магнитной системы импульсного ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем использовалось математическое моделирование с помощью программного комплекса Elcut [72].

С целью выяснения влияния укорочения магнитной системы импульсного ЛЭМД на его интегральную работу и тяговое усилие используем и сопоставим результаты проведенного математического моделирования базисного и укороченного вариантов двигателя. Для этого, как и в работе [77], была спроектирована пара образцов импульсных ЛЭМД с осевыми длинами магнитных систем и обмоток, отличающимися в 1,5 раза.

Базисный двигатель имел относительную длину обмотки  $y$ , равную значению  $y = l_o/R_1 = 1,76$  [32; 76]. Другой, "короткий", был разработан нами с укороченной магнитной системой и относительной длиной  $y_k = l_{ок}/R_{1к} = 1,17$ . Пара таких импульсных ЛЭМД имела одинаковые геометрические соотношения и объемы  $V_d$  активных материалов. Магнитопроводы обоих двигателей выполнены из стали марки Ст.3, величина МДС обмоток принята одинаковой и равной 2974,3А, как и в работах [32; 76].

На рисунке 2.14 приведены статические тяговые характеристики исследуемых ЛЭМД, полученные при математическом моделировании и позволяющие провести их сравнение по величинам тягового усилия и интегральной работы. Максимальное тяговое усилие «короткого» двигателя, соответствующее началу входа якоря в расточку статора, превосходит аналогичное усилие базисного двигателя на 30%. Это объясняется тем, что у «короткого» двигателя произошло увеличение поверхностей взаимодействия за счет увеличения размеров внешнего и центрального полюсов статора, а также ширины  $\Delta R'$  якоря (Рисунок 2.13).

Поскольку исследуемые двигатели имеют различную длину обмоток возбуждения, которая определяет и различный рабочий ход якоря, то сравнение двигателей по величине интегральной работы необходимо выполнить для оди-

накового относительного рабочего хода двигателей, равного  $\delta_* = \delta/l_0 = 0,118$ .

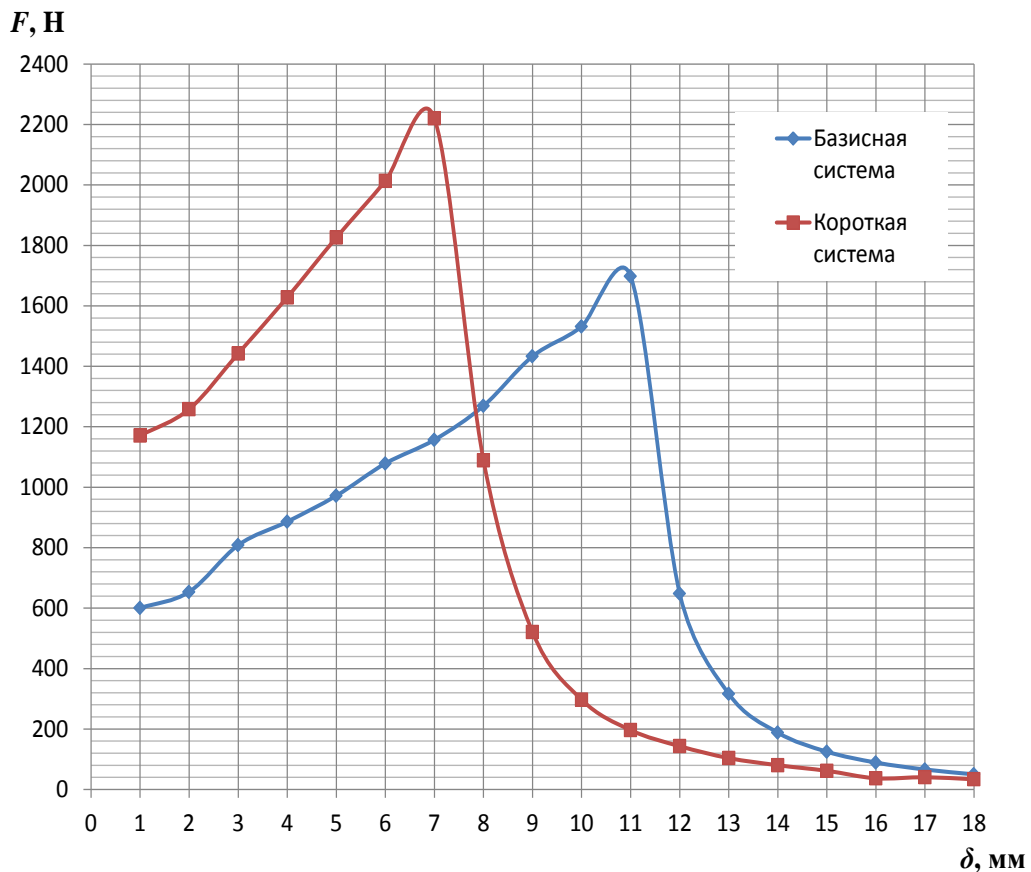


Рисунок 2.14 – Статические тяговые характеристики базисной и укороченной магнитной системы импульсного ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем при математическом моделировании

В качестве примера на рисунке 2.15 представлена картина поля импульсного ЛЭМД с укороченной магнитной системой для рабочего зазора  $\delta = 7$  мм, соответствующего началу момента вхождения якоря в расточку статора.

При сравнении двигателей по величине интегральной работы  $A_{\text{и}}$  целесообразно тяговую характеристику условно разделить на два участка: первый – от начала движения до начала вхождения якоря в расточку статора, второй – после вхождения якоря в расточку статора. Сравнение двигателей на первом участке проведем для одинакового относительного значения хода якоря  $\delta_{*(1)} = \delta_{(1)}/l_0 = 0,092$ , что соответствует абсолютным значениям хода якоря для базисного двигателя  $\delta_{\text{Б}(1)} = 7$  мм, а для «короткого» двигателя  $\delta_{\text{К}(1)} = 4,7$  мм. В результате расчета получены следующие значения интегральных работ  $A_{\text{и}}$  на первом участке: у базисного ЛЭМД  $A_{\text{и.Б}(1)} = 2,61$  Дж, у «короткого»  $A_{\text{и.К}(1)} = 3,32$  Дж.

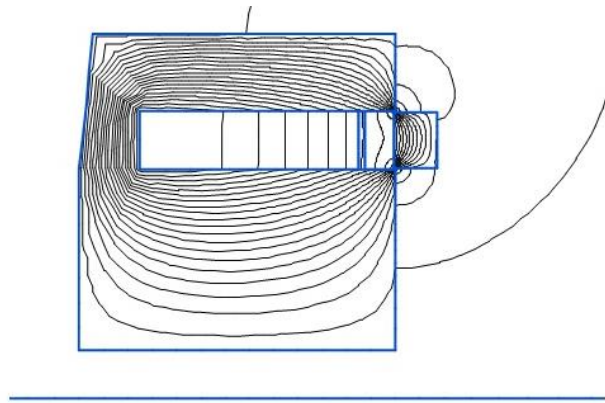


Рисунок 2.15 – Картина поля модели импульсного ЛЭМД с укороченной магнитной системой при зазоре  $\delta=7$  мм

Рост  $A_{и}$  у «короткого» двигателя вызван увеличением размера  $\Delta R$ , за счет которого уменьшился паразитный радиальный поток рассеяния  $\Phi_L$  (Рисунок 2.13), а полезный рабочий поток  $\Phi_{в.з}$  воздушного зазора соответственно возрос, что определило повышение тягового усилия на участке  $\delta_{к(1)}$ .

Сравнение двигателей на втором участке (после вхождения в расточку) так же выполним для одинакового относительного значения хода якоря на этом участке  $\delta_{*(2)} = \delta_{(2)} / l_0 = 0,118$ , что соответствует абсолютным значениям хода якоря для базисного двигателя  $\delta_{Б(2)} = 9$  мм, а для «короткого» двигателя  $\delta_{К(2)} = 6$  мм. В результате расчета получены следующие значения интегральных работ  $A_{и}$  на втором участке: у базисного ЛЭМД  $A_{и.Б(2)} = 9,87$  Дж, у «короткого»  $A_{и.К(2)} = 9,39$  Дж, что практически одинаково.

Сравнение тяговых характеристик на всём рабочем ходе (на первом и втором участках) показало, что двигатель с укороченной магнитной системой и относительной длиной обмотки  $y_k = 1,17$  при одинаковом относительном ходе якоря имеет практически ту же интегральную работу, что и базисный ЛЭМД с длиной обмотки  $y = 1,76$ , отличие составляет около 2%.

Таким образом, импульсные ЛЭМД поперечного магнитного поля одинакового объема с укороченной в осевом направлении МС и длиной обмотки  $y_k = 1,17$  на 30% эффективнее базисных ЛЭМД с длиной  $y = 1,76$  по удельным си-

ловым показателям на относительно коротких ходах якоря, когда ход  $\delta < 0,15l_0$ . Применение импульсных ЛЭМД с укороченной МС в этом случае позволит при заданных значениях максимального тягового усилия снизить массу и добиться экономии активных материалов до 30% [75]. Для детального анализа необходимо сопоставить, как будут меняться плотность тока и максимальное тяговое усилие двигателя при укорочении магнитной системы. Это позволит определить диапазон изменения относительной длины обмотки при укорочении магнитной системы. Недостатком «коротких» импульсных ЛЭМД является более напряжённый тепловой режим обмотки возбуждения из-за уменьшенного объёма обмотки и завышенной вследствие этого плотности тока в ней.

#### **2.4 Влияние конструктивных параметров устройства удержания якоря на величину усилия удержания интегрированного ЛЭМД**

Одним из способов повышения удельных силовых и энергетических показателей импульсных ЛЭМД является накопление магнитной энергии в рабочих зазорах двигателя на этапе трогания якоря за счет задержки (удержания) его движения. В этом случае при появлении и возрастании тока в обмотке возбуждения двигателя его якорь остается некоторое время в неподвижном состоянии, несмотря на возрастающую силу тяги рабочих зазоров за счет статического нагружения двигателя, реализуемого устройством электромагнитного удержания якоря. Якорь начинает движение с увеличенным до необходимой величины начальным тяговым усилием. Регулирование усилия удержания  $F_{уд}$  в этой конструкции двигателя осуществляется достаточно просто и в широком диапазоне изменения  $F_{уд}$  за счёт изменения тока в обмотке удерживающего электромагнита, питаемого от отдельного источника [9; 78].

Стремление упростить конструкцию импульсного ЛЭМД и одновременно повысить его удельные силовые и энергетические показатели привели к идее интеграции конструкции двигателя и устройства удержания якоря на основе общего магнитопровода и общей МДС [20; 79-86].

В такой конструкции двигателя его якорь 1 на этапе трогания удерживается собственным магнитным полем за счет применения ферромагнитной направляющей корпуса 2 (Рисунок 2.16), являющейся верхним магнитным шунтом по отношению к верхнему рабочему зазору  $\delta_{\text{в}}$ . Нижним магнитным шунтом является ферромагнитная направляющая 3 якоря. Таким образом, в данной конструкции ЛЭМД с двумя рабочими зазорами последние шунтированы соответствующими конструктивными элементами двигателя - верхним и нижним магнитными шунтами.

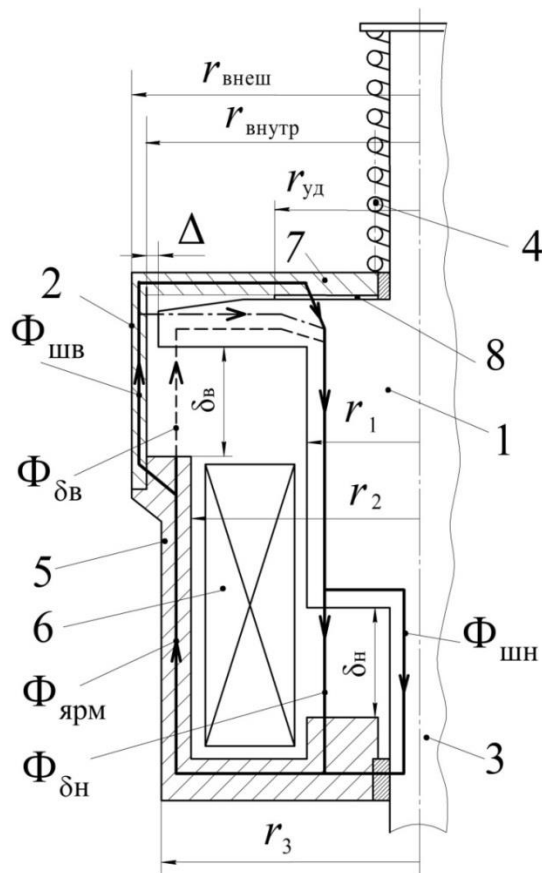


Рисунок 2.16 – Конструктивная схема интегрированного ЛЭМД:

1- втяжная часть комбинированного якоря; 2 – цилиндрическая часть ФНК; 3 - нижний направляющий стержень; 4 - возвратная пружина; 5- ярмо; 6 - обмотка возбуждения; 7 – торцевая часть ФНК; 8 – регулировочная шайба;  $\delta_{\text{в}}$ ,  $\delta_{\text{н}}$  и  $\Delta$  – верхний, нижний рабочие и технологический зазоры соответственно;  $\Phi_{\text{шв}}$ ,  $\Phi_{\delta_{\text{в}}}$ ,  $\Phi_{\text{ярм}}$ ,  $\Phi_{\delta_{\text{н}}}$  и  $\Phi_{\text{шн}}$  – магнитные потоки верхнего шунта, верхнего рабочего зазора, ярма, нижнего рабочего зазора и нижнего шунта соответственно

При работе импульсного ЛЭМД с устройством удержания, интегрированным в конструкцию, оба шунта могут насыщаться и влиять на характеристики двигателя. Экспериментальные исследования таких интегрированных ЛЭМД

показали, что регулирование усилия удержания в них затруднено, поскольку оно определяется несколькими конструктивными параметрами двигателя.

Исследуем влияние конструктивных параметров верхнего ферромагнитного шунта, а именно величины удерживающей площадки, с помощью которой создаётся усилие удержания, на величину этого усилия на этапе трогания. В рассматриваемой конструкции ЛЭМД усилие удержания  $F_{уд}$  возникает между поверхностями сопряжения, образованными верхней плоской частью якоря 1 и верхней внутренней частью ферромагнитного шунта 2 при их соприкосновении или сближении с воздушным зазором  $\delta_{в.0}$ . У такого двигателя в первый момент времени после подключения обмотки к источнику питания, пока появившееся магнитное поле ещё не успело развернуться, оба магнитных шунта также не насыщены и обладают небольшими магнитными сопротивлениями  $R_{мвш}$  и  $R_{мнш}$ , причем  $R_{мвш} = R_{мвш1} + R_{мвш2}$ .

Из схемы замещения магнитной цепи ЛЭМД без учета потоков рассеяния (Рисунок 2.17), соответствующей конструктивной схеме на рисунке 2.16, следует, что магнитный поток  $\Phi_{ярм}$  ярма 5 в виде двух составляющих

$$\Phi_{ярм} = \Phi_{шв} + \Phi_{\delta в} = \Phi_{шн} + \Phi_{\delta н} \quad (2.41)$$

проходит в якорь ЛЭМД почти полностью через верхний шунт (элементы  $R_{мвш}$  и  $R_{мво}$ ), минуя верхний рабочий зазор  $\delta_{в}$ , обладающий для этого случая значительно бóльшим магнитным сопротивлением  $R_{мв\delta}$  по сравнению с магнитным сопротивлением ветви  $R_{мв}$  верхнего шунта (Рисунок 2.17), и технологический зазор  $\Delta$ :

$$R_{мв} = R_{мвш} + R_{мво}; \quad (2.42)$$

$$R_{мво} = \frac{\delta_{во}}{\mu_o \cdot S_{уд}}; \quad R_{мв\Delta} = \frac{\Delta}{\mu_o \cdot S_{шв}}, \quad (2.43)$$

где  $R_{мво}$  – магнитное сопротивление воздушного зазора  $\delta_{во}$ , создающего усилие удержания и образованного поверхностями сопряжения верхнего шунта и верхней части якоря 1. Это сопротивление в рассматриваемый момент значительно меньше сопротивления шунта  $R_{мвш}$  из-за минимальной величины воздушного

зазора  $\delta_{\text{во}}$ , выбираемого в исходном состоянии возвратной пружиной 4, и тем более меньше магнитного сопротивления технологического зазора  $R_{\text{мв}\Delta}$  [81].

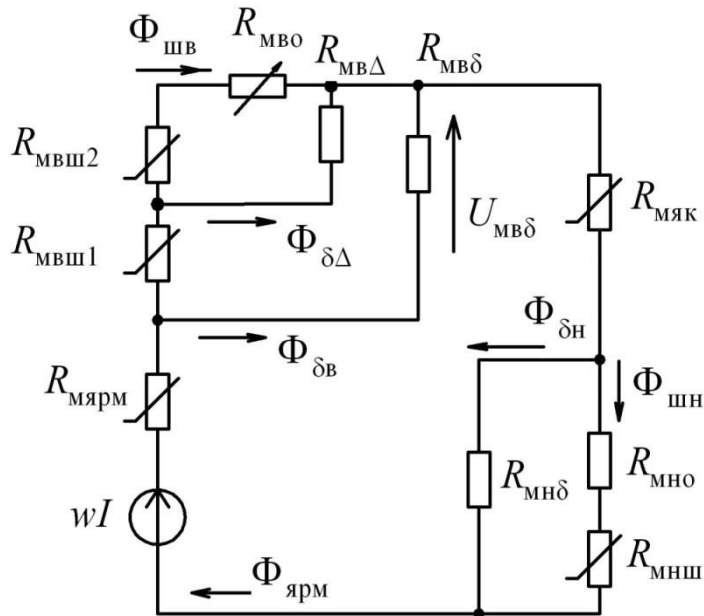


Рисунок 2.17 – Схема замещения магнитной цепи интегрированного ЛЭМД на этапе трогания

Следовательно, выражения (2.41) и (2.42) можно записать так:

$$\Phi_{\text{ярм}} \approx \Phi_{\text{шв}}; \quad R_{\text{мв}} = R_{\text{мвш}}.$$

Тогда за счет возникающей электромагнитной удерживающей силы между верхним шунтом и верхней частью якоря последний притягивается к неподвижному шунту и, несмотря на возрастание тока в обмотке, удерживается в этом положении.

Величина удерживающей силы  $F_{\text{уд}}$  для этого случая зависит от величины магнитного потока верхнего шунта  $\Phi_{\text{шв}}$  и площади его соприкосновения с плоской частью якоря – площадки удержания  $S_{\text{уд}}$ , образованной регулировочной шайбой 8 (Рисунок 2.16). Величина  $\Phi_{\text{шв}}$  в свою очередь при известной индукции насыщения  $B_0$  материала направляющего корпуса (верхнего шунта) определяется его площадью поперечного сечения  $S_{\text{шв}}$ . Следовательно, величина удерживающей силы при этих условиях будет являться функцией двух конструктивных параметров - площадей  $S_{\text{уд}}$  и  $S_{\text{шв}}$ .

По мере увеличения МДС обмотки  $wI$  на этапе трогания якоря магнитный

поток верхнего шунта  $\Phi_{шв}$  также возрастает, увеличивает удерживающую силу и насыщает этот ферромагнитный шунт, магнитное сопротивление которого  $R_{мвш}$  начинает возрастать. В результате происходит замедление роста потока шунта и одновременно с этим перераспределение потоков  $\Phi_{шв}$  и  $\Phi_{\deltaв}$  в соответствии с уравнением (2.41), а именно: всё бóльшая часть потока ярма  $\Phi_{ярм}$  в виде составляющей потока  $\Phi_{\deltaв}$  проходит через верхний рабочий зазор (пунктирная линия на рисунке 2.16) и элемент  $R_{мв\delta}$  на схеме замещения (Рисунок 2.17), создавая дополнительную силу тяги вниз, действующую на комбинированный якорь 1 двигателя. Аналогичные процессы происходят и в нижнем шунте с тем отличием, что он насыщается раньше верхнего, и магнитное сопротивление паразитного воздушного зазора  $R_{мно}$  при работе двигателя не меняется и соответственно тяговое усилие в этом месте не создается.

Якорь ЛЭМД оторвётся от площадки удержания верхнего шунта и тронется тогда, когда сумма тяговых сил верхнего  $F_{\deltaв}$  и нижнего  $F_{\deltaн}$  рабочих зазоров (без учёта потоков рассеяния) сравняется и превысит удерживающее усилие верхнего шунта  $F_{уд}$ :

$$F_{уд} < F_{\deltaв} + F_{\deltaн}. \quad (2.44)$$

Для оценки влияния конструктивных параметров верхнего шунта в момент трогания якоря выразим каждую из составляющих по формуле Максвелла на один рабочий воздушный зазор. Тогда (2.44) примет вид:

$$\frac{\Phi_{шв}^2}{2\mu_0 \cdot S_{уд}} < \frac{\Phi_{\deltaв}^2}{2\mu_0 \cdot S_{\deltaв}} + \frac{\Phi_{\deltaн}^2}{2\mu_0 \cdot S_{\deltaн}}, \quad (2.45)$$

где  $S_{\deltaв}$ ,  $S_{\deltaн}$  – площади верхнего и нижнего рабочих воздушных зазоров ЛЭМД.

Выразим в (2.45) поток  $\Phi_{\deltaв}$  (Рисунок 2.17) как разность из (2.41). С учетом равенства сечений рабочих зазоров, ярма и якоря  $S_{\deltaв} = S_{\deltaн} = S_{ярм} = S_{як}$  и потоков  $\Phi_{\deltaн} = \Phi_{ярм}$  представим выражение (2.45) в виде [81]:

$$\frac{\Phi_{шв}^2}{S_{уд}} < \frac{(\Phi_{ярм} - \Phi_{шв})^2}{S_{ярм}} + \frac{\Phi_{ярм}^2}{S_{ярм}}. \quad (2.46)$$

Заметим, что равенство потоков  $\Phi_{\deltaн} = \Phi_{ярм}$  происходит при условии насыщения нижнего шунта. В действительности поток  $\Phi_{\deltaн}$  будет несколько меньше



потока  $\Phi_{\text{ярм}}$  на величину  $\Phi_{\text{шн}}$  (Рисунок 2.17). Однако принятое выше некоторое завышение потока  $\Phi_{\text{дн}}$  до величины  $\Phi_{\text{ярм}}$  и, соответственно, завышение тягового усилия нижнего рабочего зазора оправдано тем, что в создании тягового усилия двигателя на этапе трогания участвуют и потоки рассеяния, которые при анализе не учитываются.

Представив (2.46) в относительных единицах, приняв за базисные величины  $\Phi_{\text{ярм}}$  и сечение ярма  $S_{\text{ярм}}$  и выразив потоки и сечения участков магнитной цепи ЛЭМД в виде:

$$\Phi_{\text{шв}^*} = \frac{\Phi_{\text{шв}}}{\Phi_{\text{ярм}}}, \quad S_{\text{шв}^*} = \frac{S_{\text{шв}}}{S_{\text{ярм}}}, \quad S_{\text{уд}^*} = \frac{S_{\text{уд}}}{S_{\text{ярм}}},$$

решим его относительно  $\Phi_{\text{шв}^*}$  и получим:

$$\Phi_{\text{шв}^*} < \left( -1 + \sqrt{\frac{2}{S_{\text{уд}^*}} - 1} \right) / \left( \frac{1}{S_{\text{уд}^*}} - 1 \right). \quad (2.47)$$

Выражение, подобное (2.47), получено в работе [87].

С помощью (2.47) определены зависимости усилия удержания  $F_{\text{уд}}$  верхнего шунта от величины удерживающей площадки  $S_{\text{уд}}$  при различных фиксированных значениях потока насыщения верхнего шунта  $\Phi_{\text{шв}}$ . Для выражения усилия удержания  $F_{\text{уд}}$  в относительных единицах в виде  $F_{\text{уд}^*} = F_{\text{уд}} / F_{\text{баз}}$  в качестве базисной силы целесообразно использовать не вес якоря импульсного ЛЭМД, а силу его тяги с двумя рабочими зазорами по формуле Максвелла, принятую равной удвоенной величине силы тяги одного из воздушных рабочих зазоров, например,

верхнего: 
$$F_{\text{баз}} = 2F_{\text{дв}} = \frac{\Phi_{\text{дв}}^2}{\mu_0 \cdot S_{\text{ярм}}}.$$

Тогда выражение удерживающего усилия примет вид:

$$F_{\text{уд}^*} = \frac{F_{\text{уд}}}{F_{\text{баз}}} = \frac{\Phi_{\text{шв}}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{\text{ярм}}}{2\mu_0 \cdot S_{\text{уд}} \cdot \Phi_{\text{дв}}^2} = \frac{\Phi_{\text{шв}}^2 \cdot S_{\text{ярм}}}{2 \cdot S_{\text{уд}} \cdot (\Phi_{\text{ярм}} - \Phi_{\text{шв}})^2},$$

после преобразования которого получим:

$$F_{\text{уд}^*} = \frac{\Phi_{\text{шв}^*}^2}{2 \cdot S_{\text{уд}^*} \cdot (1 - \Phi_{\text{шв}^*})^2}. \quad (2.48)$$

В формуле (2.48) параметр  $\Phi_{\text{шв}^*} = \frac{\Phi_{\text{шв}}}{\Phi_{\text{ярм}}}$  можно рассматривать как поток,

при котором происходит насыщение верхнего шунта и появление тягового усилия за счет верхнего зазора. По (2.48) на рисунке 2.18 представлены зависимости  $F_{\text{уд}^*} = f(S_{\text{уд}^*})$  при  $\Phi_{\text{шв}^*} = \text{const}$ , показывающие влияние на усилие удержания величины удерживающей площадки верхнего шунта при заданных значениях потока насыщения этого шунта. Их анализ показывает, что с ростом величины  $S_{\text{уд}^*}$  усилие удержания  $F_{\text{уд}^*}$  падает и при этом становится более стабильным.

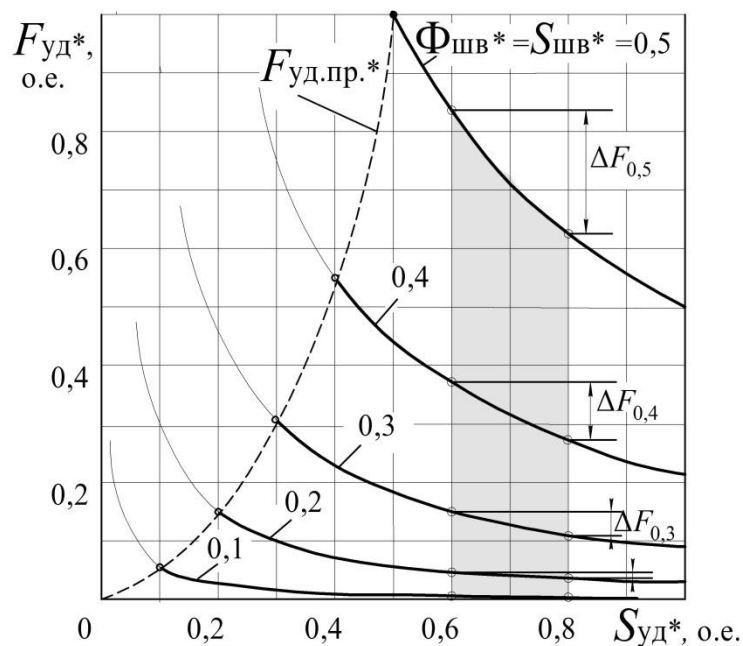


Рисунок 2.18 – Влияние конструктивных параметров интегрированного двигателя на усилие удержания якоря  $F_{\text{уд}}$

Это объясняется уменьшением магнитной индукции в воздушном зазоре, от которой усилие  $F_{\text{уд}}$  зависит в бóльшей степени, нежели от  $S_{\text{уд}}$ . Причем на каждой из кривых семейства (Рисунок 2.18), соответствующих небольшим потокам насыщения шунта ( $\Phi_{\text{шв}^*} = 0,1 \dots 0,2$ ), то есть при небольших его сечениях  $S_{\text{шв}^*}$ , присутствуют два отличающихся друг от друга участка изменения  $F_{\text{уд}^*}$  при изменении  $S_{\text{уд}^*}$ : участок со значительным изменением  $F_{\text{уд}^*}$  и с незначительным. Ниже будет показано, что первый участок изменения усилия  $F_{\text{уд}^*}$  использовать

для целей регулирования энергии рабочего хода ЛЭМД нельзя, а при больших сечениях шунта ( $\Phi_{шв*} > 0,2$ ) такая возможность появляется.

Поскольку сила удержания при регулировании энергии рабочего хода ЛЭМД должна быть меньше его тягового усилия, то область графика (Рисунок 2.18), соответствующая  $F_{уд*} > 1$ , не должна использоваться.

Так как по длине магнитной линии потока  $\Phi_{шв}$  на этапе трогания якоря ЛЭМД последовательно включены участки ферромагнитного направляющего корпуса 1 и удерживающей площадки 2 с поперечными сечениями  $S_{шв}$  и  $S_{уд}$ , то, приняв одинаковыми значения индукции указанных участков магнитной цепи ( $B_0 = B_{уд}$ ), получим для одного и того же потока  $\Phi_{шв}$  одинаковые значения поперечных сечений  $S_{уд} = S_{шв}$ .

Следовательно, при таких условиях указанные величины, выраженные в относительных единицах, будут численно равны между собой:

$$\Phi_{шв*} = S_{уд*} = S_{шв*}. \quad (2.49)$$

С учётом (9) выражение (8) для усилия  $F_{уд*}$  превратится в выражение для определения предельного удерживающего усилия

$$F_{уд.пр*} = \frac{0,5 \cdot S_{уд*}}{(1 - S_{уд*})^2}, \quad (2.50)$$

которое можно рассматривать как ограничение при выборе конструктивных параметров устройства удержания, интегрированного в конструкцию двигателя. Значения этого усилия показаны пунктирной линией (Рисунок 2.18).

Сочетание параметров  $F_{уд*}$ ,  $\Phi_{шв*}$  и  $S_{уд*}$ , которое соответствует нахождению их левее пунктирной линии (Рисунок 2.18), является недопустимым, поскольку там происходит насыщение магнитного шунта и одновременно удерживающей площадки. Последнее приводит к снижению  $F_{уд}$ , поэтому желательно, чтобы удерживающая площадка насыщалась позднее ферромагнитного направляющего корпуса, то есть при больших индукциях и соответственно потоках. Этого можно достичь либо за счёт завышения сечения  $S_{уд}$  ( $S_{уд} > S_{шв}$ ), либо за счёт большей магнитной индукции насыщения материала площадки при том

же сечении  $S_{уд}$ . По этим причинам при сочетании параметров, находящихся правее пунктирной линии, возможно регулирование усилия удержания за счёт использования, например, сменной шайбы 8 (Рисунок 2.16), как предложено в [20; 79].

Наиболее приемлемый диапазон изменения величины удерживающей площадки в этом случае следующий: при  $\Phi_{шв*} = 0,2...0,4$  принимать соответственно  $S_{уд*} \geq 0,2...0,4$ . При этом усилие удержания  $F_{уд*}$  будет изменяться в диапазоне от  $(0,05...0,15)$  до  $(0,2...0,55)$ , что позволит за счёт статического нагружения двигателя регулировать энергию рабочего хода интегрированного ЛЭМД при высоких значениях КПД [88]. Полученные соотношения используются при проектном расчете импульсных ЛЭМД с интегрированным устройством удержания якоря.

Из графика (Рисунок 2.18) следует, что небольшим значениям как усилия удержания  $F_{уд*}$ , так и диапазона его изменения  $\Delta F_{уд*}$  соответствуют и небольшие значения сечения  $S_{шв*}$  ФНК. И наоборот, стремление увеличить  $F_{уд*}$  и  $\Delta F_{уд*}$  приводит к увеличению  $S_{шв*}$ , то есть стенка ФНК утолщается.

Полученные соотношения позволяют предложить следующую методику расчета  $F_{уд}$  и диапазоны его изменения при регулировании энергии удара интегрированного ЛЭМД.

1. Задаёмся требуемым диапазоном изменения удерживающего усилия  $\Delta F_{уд*} = F_{уд макс*} - F_{уд мин*}$ .

2. Из графика (Рисунок 2.18) или из формулы (2.48) по значению  $\Delta F_{уд*}$  выбираем сечение  $S_{шв*}$  ФНК так, чтобы область допустимых значений  $S_{уд*}$  не выходила за границу допустимых значений (граница показана пунктирной линией).

3. По найденному значению  $S_{шв*}$  намечаем диапазон изменения сечений удерживающей площадки  $\Delta S_{уд*}$  и по нему находим среднее значение  $S_{уд*}$ .

4. По значениям  $S_{шв*}$  и с учетом технологического зазора (Рисунок 2.16) находим внешний и внутренний диаметры ФНК, а также толщину его стенки, а из условия неизменности сечения по длине магнитной линии находим диаметр

сменной шайбы:

$$d_{\text{уд}} = 2 r_1 \cdot d_{\text{уд}^*} = 2 r_1 \cdot \sqrt{S_{\text{уд}^*}},$$

где  $r_1$  – основной размер интегрированного ЛЭМД при проектировании, который находится, например, по (2.24).

Для более точного определения геометрии ФНК, удерживающей площадки и усилия удержания потребуется учесть свойства материала магнитопровода.

## 2.5 Условия отрыва якоря интегрированного ЛЭМД

Выше было оценено влияние конструктивных параметров на усилие удержания импульсного интегрированного ЛЭМД. С учетом полученных результатов оценим влияние конструктивных параметров верхнего магнитного шунта и величины удерживающей поверхности  $S_{\text{уд}}$  на условия отрыва якоря от устройства УЯ, интегрированного в конструкцию двигателя.

На усилие удержания интегрированного ЛЭМД оказывают влияние конструктивные параметры как самого устройства УЯ, так и ферромагнитного направляющего корпуса. В работах [81; 89-91] определены диапазоны варьирования величины удерживающей поверхности  $S_{\text{уд}}$ , которая совместно с ФНК выполняет функцию устройства удержания якоря и с помощью которой создается и изменяется усилие удержания  $F_{\text{уд}}$  на этапе трогания (Рисунок 2.16). Но полученные выражения не позволяют исследовать влияние конструктивных параметров ФНК и величины  $S_{\text{уд}}$  на условия отрыва якоря такого интегрированного ЛЭМД. Величина магнитного потока верхнего шунта  $\Phi_{\text{шв}}$  и его поперечное сечение  $S_{\text{шв}}$  оказывают воздействие на процессы намагничивания и определяют состояние, при котором на этапе трогания якоря наступает насыщение ФНК и происходит ограничение усилия  $F_{\text{уд}}$ , равного в момент отрыва якоря начальному тяговому усилию  $F_{\text{н}}$  двигателя. Известно, что с ростом усилия  $F_{\text{н}}$  повышаются энергетические показатели ЛЭМД.

Ферромагнитный направляющий корпус одновременно является и элементом конструкции и верхним магнитным шунтом, который в свою очередь слу-

жит элементом магнитной системы того же двигателя. Конструктивно ФНК содержит кроме цилиндрической и торцевую часть 7, имеющую по пути потока  $\Phi_{ш.в}$  бóльшее по сравнению с цилиндрической поперечное сечение. В торцевой части выполнена удерживающая якорь поверхность  $S_{уд}$ , сопряженная с наружной (внешней) частью комбинированного якоря 1.

Для оценки влияния указанных выше конструктивных параметров на условия отрыва якоря необходимо установить начало насыщения верхнего магнитного шунта. По графику кривой намагничивания материала ФНК (он обычно такой же, как и у ярма и якоря) и особенно по её табличным значениям довольно трудно определять начало насыщения. Поэтому требуется так аппроксимировать исходную кривую намагничивания стали ФНК, чтобы условия насыщения определялись достаточно просто.

Для этого кривую намагничивания материала шунта, которая была аппроксимирована, например, степенным полиномом [54; 91], предлагается на участке его насыщения аппроксимировать в свою очередь в виде отрезка прямой кусочно-линейной зависимости вида:

$$B(H) = B_0 + \mu_k \cdot \mu_0 \cdot H, \quad (2.51)$$

где  $\mu_k$  – относительная магнитная проницаемость материала ФНК на участке его насыщения, которая соответствует конечной магнитной индукции  $B_k$  и определяет наклон отрезка;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $B_0$  – значение магнитной индукции, при которой начинается насыщение ФНК.

Выражение (2.51) представим как уравнение прямой, касательной к кривой намагничивания материала ферромагнитного направляющего корпуса в точке  $B = B_k$ , соответствующей максимальной (конечной) индукции, принадлежащей этой кривой. Индукция  $B_k$  магнитопровода обычно задаётся при проектировании импульсных ЛЭМД [54; 91].

Величина  $B_0$  из (2.51) определяется так. Известным аналитическим способом находится уравнение касательной в точке  $B = B_k$  для кривой намагничивания материала ФНК, откуда для напряженности магнитного поля материала верхнего шунта, равной нулю, и находится значение  $B_0$ .

Тогда поток верхнего магнитного шунта составит:

$$\Phi_{ш.в} = (B_0 + \mu_k \cdot \mu_0 \cdot H_{ш.в}) \cdot S_{ш.в}, \quad (2.52)$$

где  $S_{ш.в}$  – поперечное сечение участка ФНК, который насыщается. Очевидно, что

$$S_{ш.в} = \pi \cdot (r_{внеш}^2 - r_{внутр}^2); \quad r_{внутр} = r_3 + \Delta; \quad \Delta - \text{технологический зазор (Рисунок 2.16)}.$$

Для определения напряженности магнитного поля в верхнем шунте  $H_{ш.в}$  используем схему замещения (Рисунок 2.17) [81; 91]. Из неё легко увидеть, что верхний зазор с магнитным сопротивлением  $R_{м.в\delta}$  и ветвь шунта  $R_{м.в}$  находятся под одним и тем же магнитным напряжением. Тогда по закону полного тока (без учёта потоков рассеяния) для этого участка магнитной цепи запишем:

$$H_{ш.в} \cdot l_{ш.в} + H_0 \cdot \delta_{в.о} = H_{\delta.в} \cdot l_{\delta.в}, \quad (2.53)$$

где  $H_{\delta.в}$ ,  $H_0$  и  $H_{ш.в}$  – соответственно напряженности магнитного поля в верхнем рабочем зазоре  $\delta_{в}$ , в воздушном зазоре  $\delta_{в.о}$  (на рисунке 2.16 между поверхностями сопряжения внутренней торцевой части ферромагнитного направляющего корпуса 7 и наружной части якоря 1) и в верхнем магнитном шунте;  $l_{\delta.в} = \delta_{в}$  – длина магнитной линии верхнего рабочего зазора;  $l_{ш.в}$  – длина магнитной линии верхнего магнитного шунта.

На этапе трогания якоря в момент его отрыва магнитное напряжение  $H_0 \cdot \delta_{в.о}$  на воздушном зазоре  $\delta_{в.о}$  между поверхностями сопряжения верхнего шунта и наружной части якоря незначительно по сравнению с магнитным напряжением на верхнем шунте  $H_{ш.в} \cdot l_{ш.в}$ , поэтому (2.53) упростится и примет вид:

$$H_{ш.в} \cdot l_{ш.в} = H_{\delta.в} \cdot l_{\delta.в}. \quad (2.54)$$

Из конструктивных данных интегрированного ЛЭМД следует, что  $l_{ш.в} > l_{\delta.в}$ . Тогда за счет большей длины магнитной силовой линии верхнего шунта напряженность магнитного поля в материале верхнего шунта  $H_{ш.в}$  будет несколько меньше, чем напряженность в верхнем рабочем зазоре  $H_{\delta.в}$ , которая находится по формуле:

$$H_{\delta.в} = \frac{B_{\delta.в}}{\mu_0} = \frac{\Phi_{\delta.в}}{\mu_0 \cdot S_{я\pi\mu}}.$$

Тогда из (2.54) с учетом последнего соотношения получим:

$$H_{\text{ш.в}} = H_{\delta.в} \cdot \frac{l_{\delta.в}}{l_{\text{ш.в}}} = \frac{\Phi_{\delta.в}}{\mu_0 \cdot S_{\text{ярм}}} \cdot \frac{l_{\delta.в}}{l_{\text{ш.в}}}. \quad (2.55)$$

Приняв за базу длину магнитной линии верхнего рабочего зазора  $l_{\delta.в} = \delta_{в}$ , можно ввести обозначение  $l_{\text{ш.в}*} = l_{\text{ш.в}} / l_{\delta.в}$ , относительная величина которого будет больше единицы. Тогда (2.55) с учётом соотношения  $\Phi_{\delta.в} = \Phi_{\text{ярм}} - \Phi_{\text{ш.в}}$  (Рисунок 2.16) примет вид:

$$H_{\text{ш.в}} = \frac{\Phi_{\delta.в}}{\mu_0 \cdot S_{\text{ярм}}} \cdot \frac{1}{l_{\text{ш.в}*}} = \frac{\Phi_{\text{ярм}} - \Phi_{\text{ш.в}}}{\mu_0 \cdot S_{\text{ярм}} \cdot l_{\text{ш.в}*}} = \frac{(1 - \Phi_{\text{ш.в}*}) \cdot B_{\text{ярм}}}{\mu_0 \cdot l_{\text{ш.в}*}}, \quad (2.56)$$

где  $\Phi_{\text{ш.в}*} = \Phi_{\text{ш.в}} / \Phi_{\text{ярм}}$ ;  $B_{\text{ярм}}$  – магнитная индукция в ярме двигателя.

Выражение (2.56) подставим в (2.52) и получим для потока  $\Phi_{\text{ш.в}}$ :

$$\Phi_{\text{ш.в}} = (B_0 + \mu_k \cdot \frac{(1 - \Phi_{\text{ш.в}*}) \cdot B_{\text{ярм}}}{l_{\text{ш.в}*}}) \cdot S_{\text{ш.в}}. \quad (2.57)$$

Из (2.57) выразим магнитную индукцию ярма  $B_{\text{ярм}}$  как функцию конструктивных параметров  $S_{\text{ш.в}}$ ,  $l_{\text{ш.в}}$ ,  $\mu_k$  и  $B_0$ :

$$B_{\text{ярм}} = B_0 \cdot \frac{S_{\text{ш.в}*}}{\Phi_{\text{ш.в}*} - S_{\text{ш.в}*} \cdot \mu_k \cdot (1 - \Phi_{\text{ш.в}*}) / l_{\text{ш.в}*}}, \quad (2.58)$$

где  $S_{\text{ш.в}*} = S_{\text{ш.в}} / S_{\text{ярм}}$ .

Полученное выражение (2.58) по структуре совпадает с соотношением, полученным в работе [87], и показывает величину индукции в ярме ЛЭМД, при достижении которой якорь оторвется от удерживающей поверхности и начнет движение. Эта индукция в соответствии с (2.58) зависит от площади поперечного сечения верхнего шунта  $S_{\text{ш.в}}$ , длины его средней магнитной линии  $l_{\text{ш.в}}$ , материала, из которого шунт изготовлен (параметры  $\mu_k$  и  $B_0$ ).

Установим ограничения для величины  $S_{\text{ш.в}}$ , при превышении которой якорь на этапе трогания не оторвётся от удерживающей поверхности из-за невозможности его насыщения. Исходим из того, что если с ростом тока обмотки насыщение верхнего шунта должно произойти раньше насыщения ярма, то есть при меньшей индукции, нежели в ярме ЛЭМД, то  $B_{\text{ярм}} < B_0$  или:

$$B_{\text{ярм}} / B_0 < 1. \quad (2.59)$$



Тогда из (2.58) с учётом (2.59) получим неравенство:

$$\frac{S_{\text{ш.в}^*}}{\Phi_{\text{ш.в}^*} - S_{\text{ш.в}^*} \cdot \mu_{\text{к}} \cdot (1 - \Phi_{\text{ш.в}^*}) / l_{\text{ш.в}^*}} < 1. \quad (2.60)$$

После преобразований (2.60) получим условия отрыва якоря:

$$S_{\text{ш.в}^*} < \frac{\Phi_{\text{ш.в}^*} \cdot l_{\text{ш.в}^*}}{l_{\text{ш.в}^*} + \mu_{\text{к}} \cdot (1 - \Phi_{\text{ш.в}^*})}. \quad (2.61)$$

При невыполнении условия (2.61) насыщения этого шунта не произойдёт ни при каком токе в обмотке ЛЭМД, а его якорь не начнёт движение.

С помощью неравенства (2.61) получим область возможных сочетаний параметров  $S_{\text{ш.в}^*}$  и  $\Phi_{\text{ш.в}^*}$  при заданных значениях параметров  $l_{\text{ш.в}^*}$  и  $\mu_{\text{к}}$ . В случае применения в качестве материала шунта конструкционной стали Ст3 по приведённой выше методике для индукции  $B_{\text{к}}$ , например, равной 2Тл, получим значения  $B_0 = 1,77$  Тл и  $\mu_{\text{к}} = 68$ . Тогда, приняв длину  $l_{\text{ш.в}^*} = 1,5$ , это неравенство получит более простой вид [81; 91]:

$$S_{\text{ш.в}^*} < \frac{\Phi_{\text{ш.в}^*}}{1 + 45,3 \cdot (1 - \Phi_{\text{ш.в}^*})}. \quad (2.62)$$

С помощью (2.62) установлена область сочетаний для конструктивных параметров  $S_{\text{ш.в}^*}$  и  $S_{\text{уд}^*}$ . Эта область в виде неравенства (2.63) и с учетом ограничений, установленных в [81; 91], показана заливкой (Рисунок 2.19).

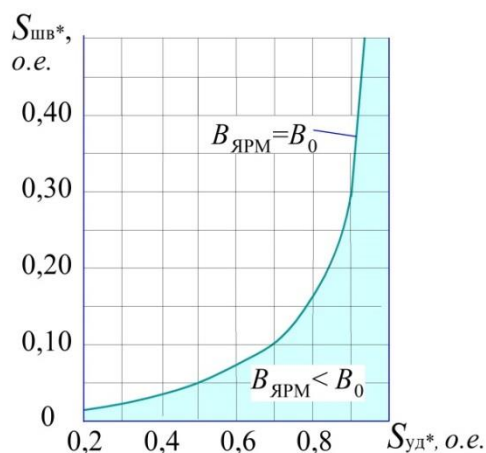


Рисунок 2.19 – Область возможных сочетаний площади поперечного сечения магнитного шунта (сталь Ст3) в момент отрыва якоря и величины поверхности удержания

$$S_{ш.в*} < \frac{1 - \sqrt{(2/S_{уд*}) - 1}}{1 - (46,3/S_{уд*}) + 45,3\sqrt{(2/S_{уд*}) - 1}}. \quad (2.63)$$

На границе области всегда выполняется соотношение  $B_0 = B_{ярм}$  и отрыва якоря от устройства удержания в этом случае не произойдёт. С учётом ограничений и рекомендаций, изложенных выше, с помощью (2.58) получена зависимость относительной магнитной индукции в ярме ЛЭМД от конструктивных параметров  $S_{ш.в*}$  и  $S_{уд*}$  при  $\mu_k = 68$ ;  $l_{ш.в*} = 1,5$  и  $B_0 = 1,77$  Тл (для стали Ст3) в момент отрыва якоря:

$$\frac{B_{ярм}}{B_0} < \frac{S_{ш.в*}}{\Phi_{ш.в*} - 45,3 \cdot S_{ш.в*} \cdot (1 - \Phi_{ш.в*})}. \quad (2.64)$$

В работе [81] найдена зависимость, позволяющая оценить взаимное влияние параметров ФНК в момент отрыва якоря от удерживающей поверхности:

$$\Phi_{ш.в*} < \frac{-1 + \sqrt{(2/S_{уд*}) - 1}}{(1/S_{уд*}) - 1}. \quad (2.65)$$

Тогда условие (2.64) с учётом (2.65) примет вид [91]:

$$\frac{B_{ярм}}{B_0} < \frac{S_{ш.в*} \cdot (1 - 1/S_{уд*})}{1 - (1 + 45,3 \cdot S_{ш.в*}) \cdot \sqrt{(2/S_{уд*}) - 1} + (45,3 \cdot S_{ш.в*} / S_{уд*})}. \quad (2.66)$$

На рисунке 2.20 представлены границы и области изменения магнитной индукции ярма ЛЭМД в момент отрыва якоря при различных сочетаниях конструктивных параметров.

На нём участки резкого возрастания индукции в ярме на границах областей свидетельствуют о недопустимом сочетании геометрических размеров интегрированного ЛЭМД.

Равенство  $B_0 = B_{ярм}$ , соответствующее одинаковым сечениям шунта и ярма, также является недопустимым, поскольку при этом одновременно наступает насыщение ярма и участка ферромагнитного направляющего корпуса, в результате чего тяговое усилие импульсного ЛЭМД падает из-за перераспределения потоков в магнитной системе двигателя.

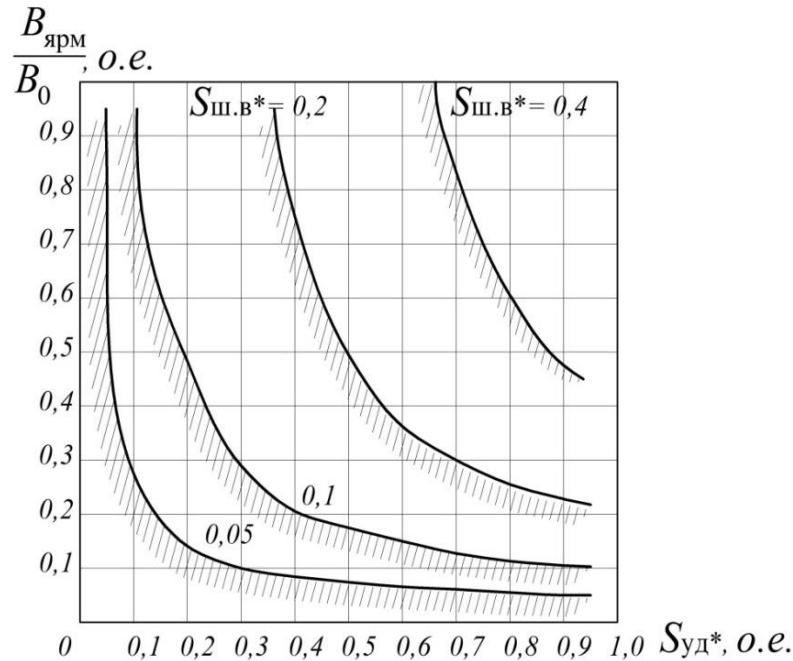


Рисунок 2.20 – Области изменения магнитной индукции в ярме ЛЭМД в момент отрыва якоря при изменении конструктивных параметров шунта  $S_{\text{ш.в}^*}$  и удерживающей поверхности  $S_{\text{уд}^*}$  для стали Ст3

Из рисунка 2.20 следует, что большее значение параметра  $S_{\text{ш.в}^*}$  (толщина стенки цилиндрической части ФНК) расширяет область существования параметра  $S_{\text{уд}}$ . При слишком тонкой стенке, например,  $S_{\text{ш.в}^*} = 0,025$  (Рисунок 2.20), учитывая ограничение на параметр  $S_{\text{уд}^*} \geq 0,2 \dots 0,4$  [81; 89; 90], затруднительно получить значительную магнитную индукцию ярма, обеспечивающую и большее удерживающее усилие. Учтя указанные выше ограничения, можно в полном объёме использовать преимущества конструкции интегрированного ЛЭМД для повышения их удельных энергетических показателей.

Для подтверждения расчётов в программном комплексе ELCUT [72] проведено математическое моделирование магнитной системы интегрированного ЛЭМД в момент отрыва якоря. На рисунке 2.21 показана картина поля линий магнитного потока модели при МДС обмотки  $w \cdot I = 1470$  А и конструктивных параметрах  $S_{\text{ш.в}^*} = 0,1$ ;  $\delta = 20$  мм;  $S_{\text{уд}^*} = 0,5$ ;  $B_{\text{ярем}} / B_0 = 0,16 \dots 0,21$  для стали Ст3.

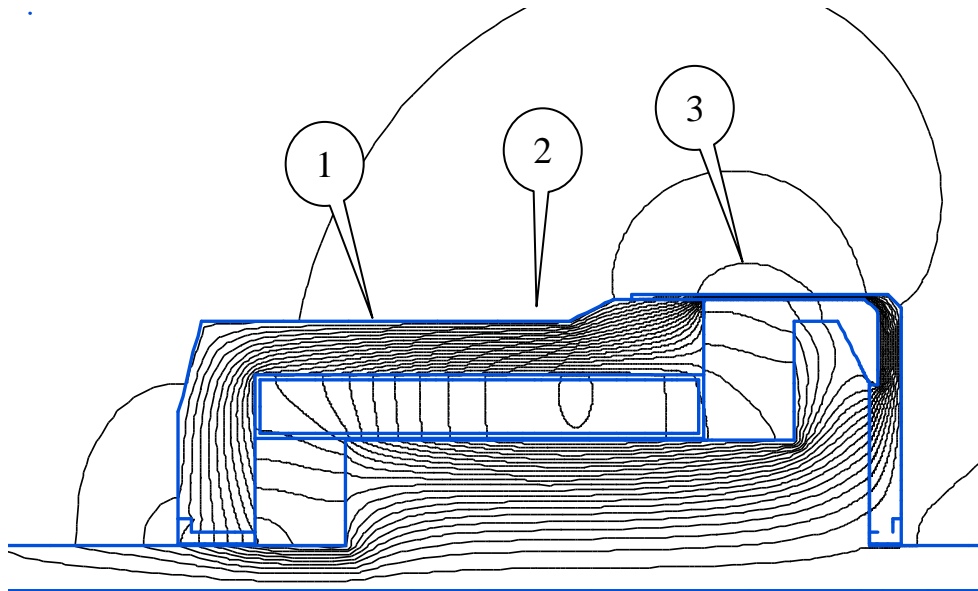


Рисунок 2.21 – Картина поля линий магнитного потока модели при МДС  $w \cdot I = 1470 \text{ А}$  и воздушном зазоре  $\delta = 20 \text{ мм}$

Для этого с целью определения индукции  $B_0$  был проведен численный эксперимент. При моделировании для фиксированных значений рабочего зазора и МДС обмотки вычислялось тяговое усилие, действующее на якорь. Величина МДС обмотки с каждым последующим расчётом повышалась до тех пор, пока знак статического тягового усилия не изменялся на противоположный, что соответствует моменту отрыва якоря при абсолютном значении тягового усилия, близком к нулю. При таком статическом режиме вычислялась индукция в ФНК в момент отрыва якоря [89-91].

В результате численного эксперимента были получены магнитные индукции в шунте  $B_0 = 1,82 \text{ Тл}$  (точка 3 на рисунке 2.21) и в ярме  $B_{я1} = 0,21 \text{ Тл}$ ,  $B_{я2} = 0,29 \text{ Тл}$  (точки 1 и 2) при МДС обмотки  $w \cdot I = 1470 \text{ А}$  и конструктивных параметрах  $S_{ш.в*} = 0,1$ ;  $\delta = 20 \text{ мм}$ ;  $S_{уд*} = 0,5$ ;  $B_{ярм}/B_0 = 0,16 \dots 0,21$  и усилия, приложенном к якорю, равном  $0,039 \text{ Н}$ . А по значению магнитной индукции ярма нетрудно рассчитать усилие удержания, которое становится равным начальному тяговому усилию интегрированного ЛЭМД.

Результаты численного эксперимента практически совпадают с расчётными данными. Так, например, для указанных выше параметров значения индукции  $B_0$ , соответствующие началу насыщения магнитного шунта, полученные

расчетом с использованием аппроксимации кривой намагничивания полиномом девятой степени [54; 87] ( $B_0=1,77$  Тл) и численным экспериментом ( $B_0=1,82$  Тл), отличаются на 2-3%, а значения  $B_{\text{ярм}} / B_0$  соответствуют областям изменения кривых (Рисунок 2.20).

Таким образом, получены следующие результаты:

1) установлены области допустимых сочетаний площади поперечного сечения верхнего магнитного шунта и удерживающей поверхности, а также границы изменения магнитной индукции в ярме двигателя в момент отрыва якоря. При произвольном сочетании конструктивных параметров, выходящих за границы этих областей, интегрированный ЛЭМД неработоспособен;

2) с ростом поперечного сечения верхнего магнитного шунта наблюдается рост магнитной индукции ярма, при которой наступает отрыв якоря и движение его с увеличенным начальным тяговым усилием. Этот рост более выражен для меньших значений удерживающей поверхности;

3) на основе кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания материала ФНК (верхнего магнитного шунта) получено выражение магнитной индукции ярма в момент отрыва якоря, которое позволит рассчитать усилие удержания интегрированного ЛЭМД.

### Выводы

1. При заданных интегральной работе и превышении температуры обмотки, исходя из минимума объема активных материалов, определены рациональные геометрические размеры импульсных ЛЭМД.

2. Установлены оптимальная относительная длина обмотки и соотношения, связывающие объемы проводниковых материалов и магнитопровода, с радиусом якоря и длиной обмотки. При относительной длине  $y = 3$  найден оптимальный базисный геометрический параметр – радиус якоря, что позволяет начать проектный расчет ЛЭМД.

3. Сравнение импульсных ЛЭМД продольного и поперечного магнитного поля в случае укорочения длины их магнитной системы в осевом направлении

при том же объеме активных материалов показало возможность увеличения удельного тягового усилия. Оно не зависит от особенностей магнитной системы, что позволяет сформулировать общий для них принцип – принцип укорочения, на основе которого осуществляется повышение удельных силовых показателей импульсных ЛЭМД на 30...50% при соответствующей коррекции ПВ двигателя.

4. Для интегрированного ЛЭМД установлены области допустимых сочетаний площади поперечного сечения верхнего магнитного шунта и удерживающей поверхности, а также границы изменения магнитной индукции в ярме двигателя в момент отрыва якоря. С ростом площади поперечного сечения ФНК будет расти не только удерживающее усилие, но и диапазон его изменения за счет уменьшения удерживающей площадки, что расширяет регулировочные свойства интегрированного двигателя.

## ГЛАВА 3. РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

### 3.1 Энергетическая структура электромеханического преобразователя электромагнитного типа

Известно, что импульсный ЛЭМД является двухступенчатым электромеханическим преобразователем (ЭМП) электромагнитного типа циклического действия. Структурно его можно представить состоящим из трех последовательно соединенных подсистем (ПС): электрической ПС, магнитной ПС и механической ПС [13; 67; 92]. Магнитная подсистема в структуре импульсного ЛЭМД является центральной. В таком двигателе за время рабочего цикла осуществляется сначала электромагнитное (между электрической и механической подсистемами), а затем электромеханическое (между магнитной и механической подсистемами) преобразование энергии.

В силу двухступенчатости преобразования энергии и наличия только одной обмотки – обмотки возбуждения – электромеханическое преобразование всегда происходит после электромагнитного, которое осуществляется на этапе трогания якоря. В результате электромагнитного преобразования в рабочих зазорах магнитной системы импульсного ЛЭМД при неподвижном якоре происходит аккумулярование магнитной энергии с определенной ее концентрацией и создается начальное тяговое усилие  $F_{\text{н}}$ , необходимое для осуществления последующего электромеханического преобразования (в режиме двигателя или генератора).

Структурные схемы ЭМП рассмотрены в ряде работ [13; 67; 92; 93]. Например, в работе [67] представлена обобщенная схема электромеханического преобразователя в виде каскадного соединения трех четырехполюсников – трех подсистем (ПС): электрической ПС, механической ПС и подсистемой связи – магнитной ПС (Рисунок 3.1). Для каждой из подсистем показаны их тепловые потери в виде мощностей  $\Delta p_{\text{эл}}$ ,  $\Delta p_{\text{маг}}$  и  $\Delta p_{\text{мех}}$ . Тепловые потери возникают за счет

электрических потерь в проводниках, потерь в магнитопроводе и потерь на трение в подшипниках и движущихся частях о воздух.

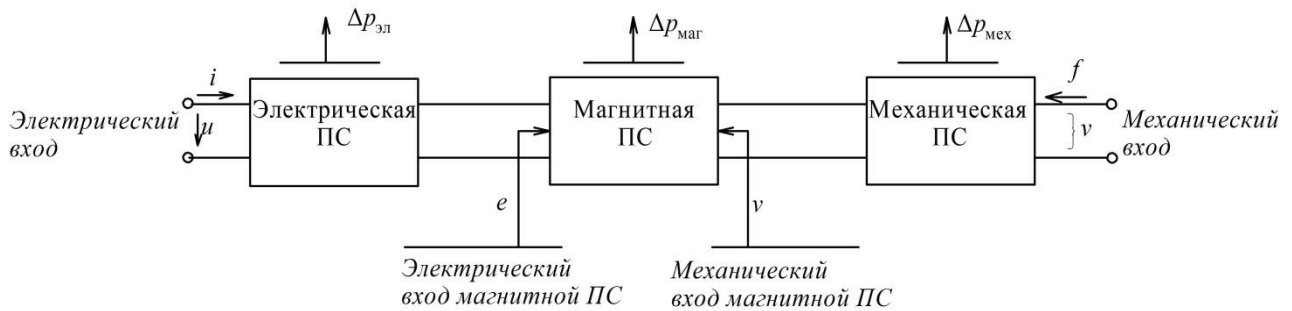


Рисунок 3.1– Общее представление устройства для электромеханического преобразования энергии [67]

По закону сохранения энергии процесс энергопреобразования можно представить согласно С. Сили через баланс энергий [67]: «Подводимая энергия (энергия на входе) = энергия на выходе + запасенная энергия + потери энергий». Это уравнение справедливо в течение всего процесса преобразования энергии, несмотря на то, что энергия существует в различных формах.

В работах [13; 67; 92; 94] потоки энергий между подсистемами структурно не разделены относительно магнитной ПС, что затрудняет анализ энергопреобразования. Представленное на рисунке 3.2 такое разделение этих потоков позволяет выделить 2 режима электромагнитного и 14 режимов электромеханического преобразования, которые (например, режимы 5...7 и 13...15) отличаются между собой степенью восстановления магнитной энергии рабочих зазоров при движении якоря, что более подробно будет исследовано в следующей главе.

На рисунке 3.2 приняты следующие обозначения:

- малыми стрелками показаны мгновенные направления потоков энергии между смежными подсистемами относительно магнитной ПС, то есть между магнитной и электрической ПС или между магнитной и механической ПС;
- большими стрелками – их результирующие направления потоков относительно магнитной ПС;
- положительными направлениями считаются направления из электрической ПС и из магнитной ПС в механическую ПС, отрицательными – наоборот;
- пунктирными линиями обозначено отсутствие потоков энергии.





менному начальному рабочему зазору. С режима электромагнитного преобразования начинаются остальные 14 режимов, предшествующих электромеханическому преобразованию энергии в ЭМП. Из них режимы 1...7 являются двигательными, а режимы 9...15 – генераторными. Очевидно, что электромагнитное преобразование энергии на этапе трогания якоря коренным образом влияет на дальнейший процесс энергопреобразования в импульсном ЛЭМД.

Таким образом, впервые в электромеханическом преобразователе электромагнитного типа структурно разделены потоки энергий между электрической и механической подсистемами относительно магнитной.

### **3.2 Концентрация магнитной энергии в рабочих воздушных зазорах импульсного ЛЭМД на этапе ее электромагнитного преобразования**

При подключении обмотки возбуждения импульсного ЛЭМД к источнику питания на этапе трогания при неподвижном якоре происходит электромагнитное преобразование энергии. Величина накопленной на этапе трогания начальной магнитной энергии  $W_m$  в рабочих воздушных зазорах объемом  $V_3$  импульсного ЛЭМД определится как

$$W_m = \int_0^{\psi_n} i(\psi) d\psi. \quad (3.1)$$

Необходимая концентрация накопленной на этом этапе магнитной энергии определится как удельная магнитная энергия

$$W_{уд} = \frac{W_m}{V_3},$$

которая позволяет начать электромеханическое преобразование с заданной интенсивностью [23; 95; 96].

Магнитную характеристику импульсного ЛЭМД  $\Psi(i)$  для начального зазора  $\delta_n$  удобнее представить степенным полиномом [9; 97], например, вида  $H(B_*) = \alpha B_* + \beta B_*^5 + \xi B_*^9$  [9], в котором  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\xi$  – коэффициенты аппроксимации, А/м, соответствующие магнитной характеристике двигателя при рабочем зазоре

$\delta = \delta_n$ . Эта характеристика позволит учесть возможное насыщение магнитной системы двигателя на этапе электромагнитного преобразования энергии.

Для оценки возможных путей повышения концентрации магнитной энергии  $W_{уд}$  в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД получим выражение запасенной на этапе трогания якоря магнитной энергии  $W_m$  с помощью системы относительных единиц [9; 54; 98] и известных соотношений для базисных величин магнитной индукции  $B_B = 1 \text{ Тл}$  и напряженности магнитного поля  $H_B = B_B / \mu_0$  магнитной системы при начальном зазоре  $\delta_n$ .

Тогда относительные величины магнитной индукции  $B_*$ , потокосцепления  $\Psi_*$ , напряженности магнитного поля  $H_*$  и тока обмотки возбуждения  $I_*$  можно представить так:

$$B_* = B/B_B; \quad \Psi_* = \Psi/\Psi_B; \quad H_* = H/H_B; \quad I_* = I/I_B \text{ и так далее.}$$

Кроме того, между ними существуют следующие соотношения [9; 98]:

$$H_* = I_*; \quad B_* = \Psi_*.$$

В результате кривая намагничивания магнитной системы импульсного ЛЭМД для начального зазора  $\delta_n$  может быть представлена в виде:

$$I_*(\Psi_*) = (\alpha \Psi_* + \beta \Psi_*^5 + \xi \Psi_*^9) / H_B$$

или

$$I_*(\Psi_*) = \mu_0 (\alpha \Psi_* + \beta \Psi_*^5 + \xi \Psi_*^9) / B_B. \quad (3.2)$$

Тогда после интегрирования (3.1) с учетом (3.2) получим:

$$W_{m, \text{пред}} = I_{\text{пред}} \cdot \Psi_{\text{пред}} \int_0^{\Psi_{n*}} I_*(\psi_*) d\psi_* = \frac{I_{\text{пред}} \cdot \Psi_{\text{пред}}}{2} \cdot \frac{\mu_0}{B_B} \cdot \Psi_{n*} \cdot \left( \alpha + \frac{\beta}{3} \Psi_{n*}^4 + \frac{\xi}{5} \Psi_{n*}^8 \right), \quad (3.3)$$

где  $0,5 I_{\text{пред}} \cdot \Psi_{\text{пред}}$  – предельная магнитная энергия, соответствующая нулевому рабочему зазору и предельному току возбуждения;  $\Psi_{n*} = \Psi_n / \Psi_{\text{пред}}$ .

Однако для произвольного значения начального зазора  $\delta_n \neq 0$  коэффициенты аппроксимации полинома (3.2) возможно определить только путем эксперимента, что на этапе проектирования затруднит анализ. С другой стороны, при начальном рабочем зазоре  $\delta_n$  магнитная система двигателя, как правило, не насыщена. Поэтому его вебер-амперная характеристика будет линейной и образует с осью тока угол  $\Theta_n$ , который зависит от характеристик магнитной систе-

мы, то есть от количества рабочих воздушных зазоров, величины начального зазора и поэтому является обобщенным конструктивным параметром.

Будем считать, что линейная магнитная характеристика для начального зазора пересечет нелинейную магнитную характеристику импульсного ЛЭМД, соответствующую конечному нулевому рабочему зазору. Точка пересечения  $M$  на рисунке 3.3 определит предельную магнитную энергию  $W_{м.пред}$ , запасаемую в рабочих зазорах двигателя на этапе трогания (на рисунке заштрихована).

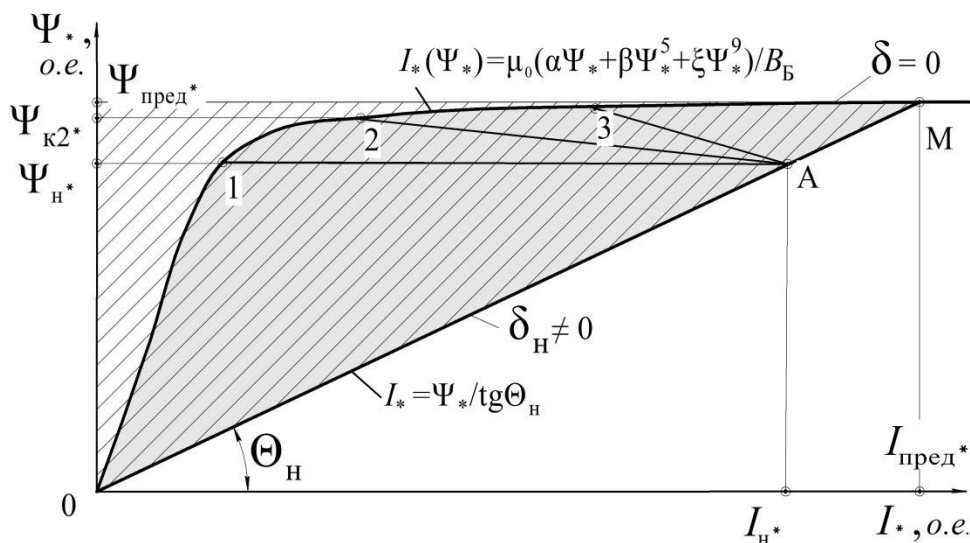


Рисунок 3.3 – Пограничные магнитные характеристики импульсного ЛЭМД и предельная магнитная энергия, запасаемая на этапе трогания (заштрихована)

Рабочая точка  $A$  (Рисунок 3.3) соответствует моменту трогания, она в действительности лежит на линейной характеристике ниже точки  $M$  и находится в области допустимых значений координат  $(I_{н*}; \Psi_{н*})$  на этапе трогания, а при движении якоря кривая намагничивания магнитопровода двигателя будет служить естественным ограничением не только относительно запасаемой магнитной энергии (заштрихована), но и механической работы (показана заливкой).

Рабочий ход импульсного ЛЭМД должен начинаться лишь после предварительного накопления на этапе трогания необходимой магнитной энергии  $W_{м.н.}$ . Такой же вывод сделан в работе [30]. Продолжение накопления магнитной энергии во время рабочего хода малоэффективно, поскольку оно сопровождается ростом потокосцепления, величина которого в конце рабочего хода ограничена

при насыщенной магнитной системе двигателя кривой намагничивания стали магнитопровода. На рисунке 3.3 траектории  $A-2$  и  $A-3$  иллюстрируют процесс аккумулирования магнитной энергии при движении якоря. К тому же точки 2 и 3 на этом рисунке свидетельствуют о возросшей по сравнению с точкой 1 остаточной магнитной энергии, не израсходованной в течение рабочего хода и остающейся в магнитной системе двигателя и снижающей эффективность электро-механического преобразования [99]. Например, остаточные магнитные энергии  $W_{м.о.2}$  и  $W_{м.о.1}$  для точек 2 и 1 можно выразить по аналогии с (3.3) и сравнить между собой.

$$W_{м.о.2} = \int_0^{\psi_{к2}} I(\psi) d\psi = \frac{I_{пред} \cdot \Psi_{пред}}{2} \cdot \frac{\mu_0}{B_B} \cdot \Psi_{к.2*} \cdot \left( \alpha + \frac{\beta}{3} \Psi_{к.2*}^4 + \frac{\xi}{5} \Psi_{к.2*}^8 \right),$$

где  $\Psi_{к.2*} = \Psi_{к.2} / \Psi_{пред}$ ;

$$W_{м.о.1} = \int_0^{\psi_{к1}} I(\psi) d\psi = \frac{I_{пред} \cdot \Psi_{пред}}{2} \cdot \frac{\mu_0}{B_B} \cdot \Psi_{к.1*} \cdot \left( \alpha + \frac{\beta}{3} \Psi_{к.1*}^4 + \frac{\xi}{5} \Psi_{к.1*}^8 \right),$$

где  $\Psi_{к.1*} = \Psi_{н.1}$ . Сравнение этих выражений показывает, что  $W_{м.о.2} > W_{м.о.1}$  за счет того, что  $\Psi_{к.2*} > \Psi_{к.1*}$ .

Для нахождения предельных координат  $(I_{пред*}; \Psi_{пред*})$  точки  $M$  представим в относительных единицах выражения сначала линейной характеристики для начального рабочего зазора  $\delta_n \neq 0$

$$I_* = \frac{1}{tg\Theta_n} \cdot \Psi_*, \quad (3.4)$$

а затем для стали магнитопровода, когда  $\delta_n = 0$  [9; 54; 98]:

$$I_*(\Psi_*) = \mu_0 (\alpha \Psi_* + \beta \Psi_*^5 + \xi \Psi_*^9) / B_B. \quad (3.5)$$

Приравняв (3.4) и (3.5), получим выражение

$$1 = \mu_0 \cdot tg\Theta_n (\alpha + \beta \Psi_*^4 + \xi \Psi_*^8) / B_B, \quad (3.6)$$

в котором для, например, стали магнитопровода марки Ст.3 значения коэффициентов аппроксимации известны [9]:  $\alpha = 625$  А/м;  $\beta = -19$  А/м;  $\xi = 44,5$  А/м.

Величина накопленной на этапе электромагнитного преобразования магнитной энергии (Рисунок 3.3) будет:

$$W_{\text{м.н}} = (0,5I_{\text{Б}}^2 \cdot L_{\text{Б}}) \cdot I_{\text{н}}^2 \cdot \text{tg}\Theta_{\text{н}}, \quad (3.7)$$

где  $I_{\text{н}}^* = I_{\text{н}}/I_{\text{Б}}$  – относительный ток трогания;  $L_{\text{н}}^* = L_{\text{н}}/L_{\text{Б}} = \text{tg}\Theta_{\text{н}}$  – относительная начальная индуктивность.

Тогда относительная величина начальной магнитной энергии  $W_{\text{м.н}}^*$ , запасаемой к моменту трогания якоря, выразится из (3.7):

$$W_{\text{м.н}}^* = W_{\text{м.н}} / (0,5I_{\text{Б}}^2 \cdot L_{\text{Б}}) = I_{\text{н}}^2 \cdot \text{tg}\Theta_{\text{н}}. \quad (3.8)$$

Из (3.8) следует, что этот запас определяется как режимным параметром  $I_{\text{н}}^*$ , так и конструктивным  $\Theta_{\text{н}}$ .

Для качественной оценки целесообразно найти предельное значение накопленной магнитной энергии, соответствующее предельным значениям тока  $I_{\text{пред}}$  и потокосцепления  $\Psi_{\text{пред}}$ . После соответствующей замены из (3.8) получим:

$$W_{\text{м.пред}}^* = I_{\text{пред}}^2 \cdot \text{tg}\Theta_{\text{н}}. \quad (3.9)$$

Например, для обобщенного конструктивного параметра  $\Theta_{\text{н}} = 20^\circ$  получим координаты точки пересечения на рисунке 3.3. Решив уравнение (3.6), находим первую координату точки  $M$  ( $\Psi_{\text{пред.20}^*} = 3,86$  о.е.), а с учетом (3.5) и найденного значения  $\Psi_{\text{пред.20}^*}$  – другую ( $I_{\text{пред.20}^*} = 10,62$  о.е.). В итоге предельная магнитная энергия, запасаемая в рабочих зазорах двигателя, будет:  $W_{\text{м.пред}}^* = I_{\text{пред}}^2 \cdot \text{tg}\Theta_{\text{н}} = 10,62^2 \cdot \text{tg}20^\circ = 41,05$  о.е. Поступая аналогично для разных значений угла  $\Theta_{\text{н}}$ , получим зависимость (3.9) на рисунке 3.4.

Анализ (3.9) показывает, что величина накопленной в течение электромагнитного преобразования предельной магнитной энергии  $W_{\text{м.пред}}^*$  практически в равной степени зависит как от конструктивного параметра  $\Theta_{\text{н}}$ , так и от предельного тока трогания  $I_{\text{пред}}^*$ , несмотря на квадратичную зависимость этой энергии от тока. Это объясняется тем, что угол  $\Theta_{\text{н}}$ , определяя точку пересечения линейной магнитной характеристики с кривой намагничивания стали (Рисунок 3.3), положением этой точки резко изменяет значение предельного тока трогания  $I_{\text{пред}}^*$ . Например, при возрастании угла  $\Theta_{\text{н}}$  от  $20^\circ$  до  $45^\circ$  величина  $\text{tg}\Theta_{\text{н}}$  увеличивается в 2,7 раза, тогда как ток уменьшается в 3,1 раза. В результате магнитная

энергия  $W_{\text{м.пред.*}}$  значительно падает в 3,6 раза [15].

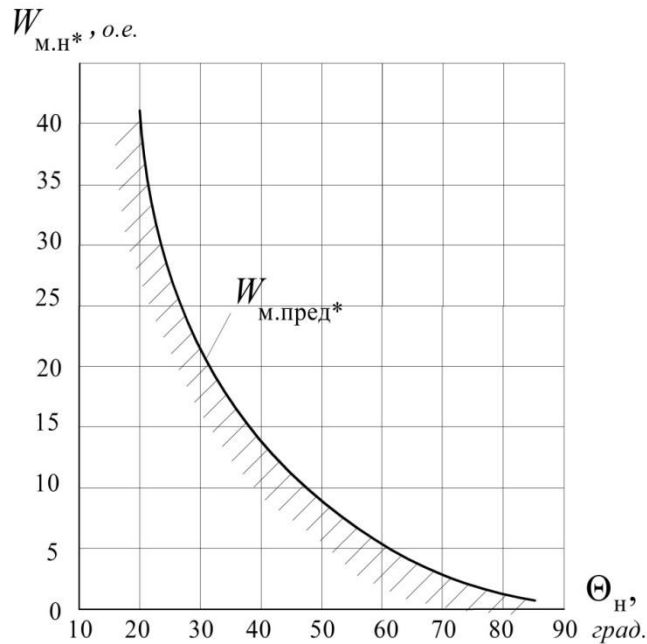


Рисунок 3.4 – Граница  $W_{\text{м.пред.*}}$  и область (заштрихована) возможных значений магнитной энергии рабочих зазоров  $W_{\text{м.н*}}$ , накопленной на этапе трогания якоря

Следует заметить, что полученные предельные значения координат для угла  $\Theta_n = 20^\circ$  ( $I_{\text{пред.20*}} = 10,62 \text{ о.е.}$  и  $\Psi_{\text{пред.20*}} = 3,86 \text{ о.е.}$ ), при котором возможно обеспечить очень высокую концентрацию магнитной энергии в рабочих зазорах двигателя на этапе трогания, на практике реализовать затруднительно, так как при проектировании обычно задаются максимальным значением магнитной индукции, обычно не превышающем 2,5 Тл, то есть при значении  $\Psi_* = 2,5 \text{ о.е.}$ , что соответствует значениям  $\Theta_n > 30 \dots 40^\circ$ .

В простейших известных конструкциях импульсных ЛЭМД нет возможности осуществить необходимую концентрацию магнитной энергии на этапе трогания якоря. В результате движение якоря начинается при небольшом токе трогания и, естественно, с небольшим запасом магнитной энергии в рабочих зазорах, что снижает буквально все энергетические и динамические показатели привода (энергия рабочего хода, КПД, быстродействие). Попытка увеличить ток трогания с помощью, например, форсировки [100] или различных механических

и электромагнитных устройств удержания якоря [9; 50; 78; 101] даже при значительных углах  $\Theta_n$  и небольших рабочих зазорах уже обеспечивает существенное повышение этих показателей.

В качестве эксперимента был использован импульсный ЛЭМД, выполненный по конструктивной схеме однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной типа ПЭМ-0,8 усилием 8 кН [102]. Этот двигатель дополнительно снабжен встроенным устройством электромагнитного удержания якоря, которое аналогично описанному в работе [9]. На основании экспериментальных динамических характеристик в виде осциллограмм рабочих процессов (Рисунок 3.5) и магнитных характеристик этого двигателя, снятых при различных рабочих зазорах, получены на плоскости  $\Psi - I$  энергетические диаграммы при изменении рабочего зазора от начального  $\delta_n = 25,5$  мм до конечного, равного нулю, по методике [5].

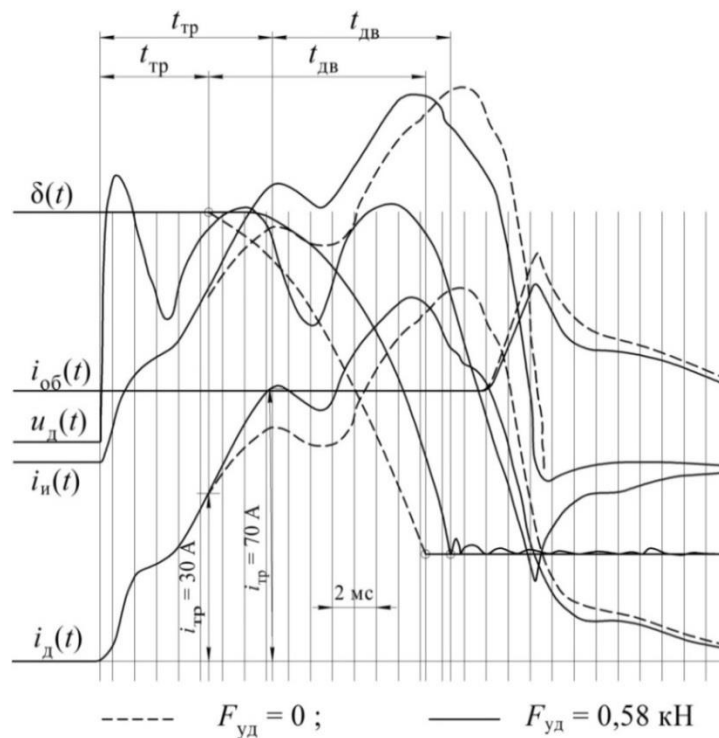


Рисунок 3.5 – Осциллограммы рабочих процессов импульсного ЛЭМД типа ПЭМ– 0,8 со встроенным устройством удержания якоря

Из них следует, что на этапе электромагнитного преобразования энергии и при отсутствии электромагнитного удержания ток трогания, принадлежащий пунктирной линии и зазору  $\delta_n = 25,5$  мм на рис 3.6, составляет  $I_{тр} = 30$  А. Ему соответствует величина начальной магнитной энергии  $W_{м.н} = 6,1$  Дж в случае пита-



ния такого двигателя от трехфазной сети напряжением 380В через выпрямитель, выполненный по трехфазной нулевой схеме [103-105]. Напротив, применение устройства удержания для того же двигателя позволило увеличить ток трогания до величины  $I_{тр.уд} = 70\text{А}$  (сплошная линия на рисунке 3.6), а величину запасаемой в рабочих зазорах начальной магнитной энергии – до  $W_{м.н.уд} = 33,1\text{Дж}$ .

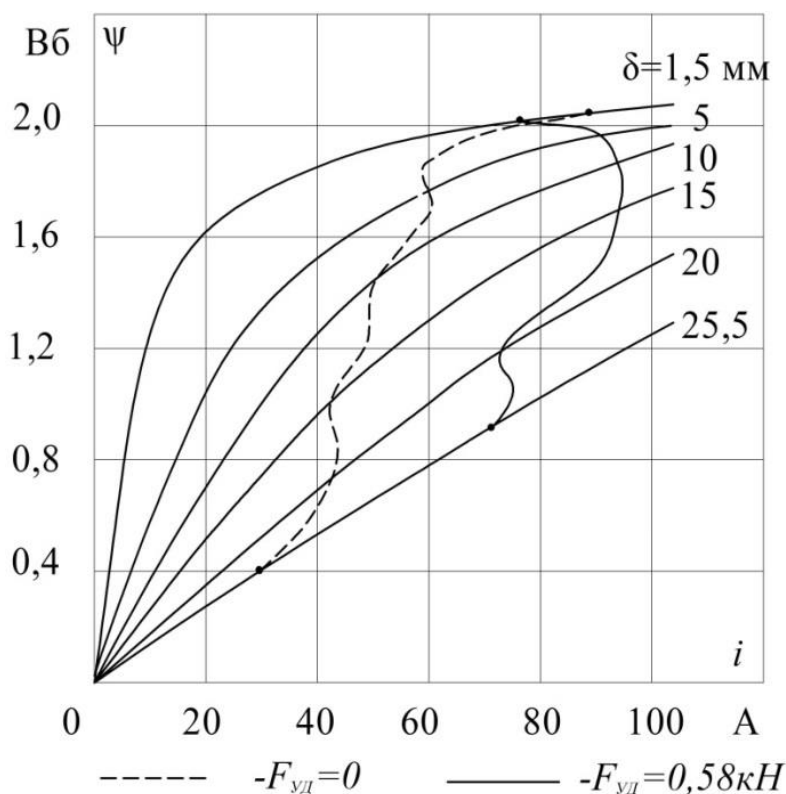


Рисунок 3.6 – Экспериментальные энергетические диаграммы импульсного ЛЭМД типа ПЭМ-0,8 для  $W_{эл} = 285 \text{ Дж}$

В итоге, несмотря на возросшие в последнем случае потери в обмотке возбуждения, энергия рабочего хода и КПД импульсного ЛЭМД типа ПЭМ-0,8 за счёт концентрации магнитной энергии на этапе трогания возросли в 2 раза.

Использование современных многозазорных конструкций импульсных ЛЭМД с встроенными устройствами удержания якоря [50; 106], у которых значение параметра  $\Theta_n$  уменьшено вследствие особенностей конструкции магнитной системы, позволит радикально повысить энергию рабочего хода, КПД и быстродействие двигателя за счёт необходимой концентрации магнитной энергии, что является предметом исследования автора.

Таким образом, теоретически обоснована и экспериментально подтвер-

ждена необходимость начала рабочего хода импульсного ЛЭМД лишь после предварительного накопления на этапе трогания необходимой магнитной энергии, максимальная величина которой при прочих равных условиях зависит от обобщенного конструктивного параметра  $\Theta_n$ , определяемого количеством рабочих воздушных зазоров и величиной рабочего хода, так и от режимного параметра – тока трогания. Продолжение эффективного накопления магнитной энергии во время рабочего хода снижается из-за ограничения потокоцепления при насыщенной магнитной системе двигателя. Так же установлено, что при изменении конструктивного параметра  $\Theta_n$ , например, от  $45^\circ$  до  $20^\circ$ , максимально возможная величина накопленной на этапе трогания магнитной энергии возрастает в 3,6 раза.

### 3.3 Предельная механическая работа электромеханического преобразователя электромагнитного типа

Полученные в [98] выражения энергетических критериев для электромеханических преобразователей (ЭМП) электромагнитного типа при насыщенном магнитопроводе, к которым относятся импульсные ЛЭМД, позволяют оценить уровень предельной магнитной энергии, которую возможно запасти в магнитной системе ЭМП и затем частично преобразовать в механическую работу. Очевидно, что эта предельная механическая работа, пропорциональная заштрихованной площади (Рисунок 3.7), будет определяться следующими предельными величинами:  $I_{\text{ПРЕД}}$  и  $\Psi_{\text{ПРЕД}}$ .

Выразим предельный ток  $I_{\text{ПРЕД}}$  из уравнения, которое соответствует точке  $A$  (Рисунок 3.7), как точке пересечения кривой намагничивания стали магнитопровода ЭМП  $I_{\text{СТ}}(\Psi)$ , соответствующей конечному рабочему зазору  $\delta_k = 0$ , с вебер-амперной характеристикой  $I_B(\Psi)$ , соответствующей начальному рабочему зазору преобразователя  $\delta_n \neq 0$  [107]:

$$I_{\text{СТ}}(\Psi) = I_B(\Psi). \quad (3.10)$$

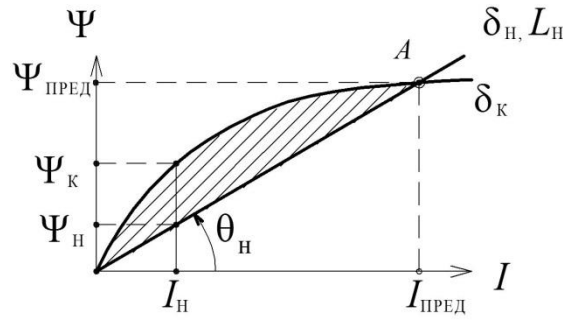


Рисунок 3.7 – К определению предельной механической работы ЭМП при насыщенной магнитной цепи

Левая часть уравнения (3.10) соответствует нелинейной характеристике намагничивания магнитопровода, а правая часть – линейной магнитной характеристике начального рабочего зазора ЭМП, в результате выражение для кривой намагничивания примет вид в относительной форме [98]:

$$\frac{\mu\mu_0}{B_B}(\alpha\Psi_* + \beta\Psi_*^5 + \xi\Psi_*^9) = \frac{1}{L_{H*}}\Psi_*, \quad (3.11)$$

где  $B_B = 1Tl$  – базисное значение магнитной индукции;  $\Psi_* = \Psi / \Psi_B$ ;  $L_{H*} = \text{tg}\Theta_H$  – относительное значение начальной индуктивности;  $\alpha$ ;  $\beta$  и  $\xi$  – коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания материала магнитопровода,  $\frac{A}{m}$  [9; 54; 102];  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость магнитопровода;  $\Theta_H$  – обобщенный конструктивный параметр ЭМП.

После преобразования (3.11) получим уравнение (учитывая, что  $\Psi_* = B_*$ )

$$\alpha + \beta\Psi_*^4 + \xi\Psi_*^8 = \frac{B_B}{\mu\mu_0 L_{H*}}$$

или

$$\Psi_*^8 + \frac{\beta}{\xi}\Psi_*^4 + \left(\frac{\alpha}{\xi} - \frac{B_B}{\xi\mu\mu_0 L_{H*}}\right) = 0,$$

решая его, получим:

$$\Psi_{\text{ПРЕД}*} = 4\sqrt{-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \left(\frac{\alpha}{\xi} - \frac{B_B}{\xi\mu\mu_0 L_{H*}}\right)}}, \quad (3.12)$$

которое подставим в выражение правой части (3.11) и получим:

$$I_{\text{ПРЕД}*} = \frac{1}{L_{\text{Н}*}} \Psi_{\text{ПРЕД}*} = \frac{1}{L_{\text{Н}*}} \sqrt[4]{-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \left(\frac{\alpha}{\xi} - \frac{B_B}{\xi\mu\mu_0 L_{\text{Н}*}}\right)}}. \quad (3.13)$$

С помощью выражений (3.12) и (3.13) оценим предельную механическую работу как магнитную энергию, запасаемую в магнитной системе при заданной кривой намагничивания материала магнитопровода и начальной индуктивности  $L_{\text{Н}}$ , которые будут являться конструктивными параметрами при проектировании. Величина  $L_{\text{Н}}$  и угол  $\Theta_{\text{Н}}$  будут опосредованно определять количество рабочих зазоров в магнитной системе и, следовательно, ее тип (однозазорный, двухзазорный, двухзазорный с ферромагнитным направляющим корпусом, одно- и двухзазорный с ферромагнитными шунтами и т. д.). Значение  $A_{\text{ПРЕД}}$  находим известным графоаналитическим способом [98; 99; 107]:

$$\begin{aligned} A_{\text{ПРЕД}} &= \Psi_{\text{ПРЕД}} \cdot I_{\text{ПРЕД}} - W_0 - W_{\text{М.Н}} = \Psi_{\text{ПРЕД}} \cdot I_{\text{ПРЕД}} - \int_0^{\Psi_{\text{ПРЕД}}} I(\Psi) d\Psi - \int_0^{I_{\text{ПРЕД}}} \Psi dI = \\ &= \left[ 0,5 - \frac{\alpha + \frac{\beta}{3} \Psi_{\text{ПРЕД}*}^4 + \frac{\xi}{5} \Psi_{\text{ПРЕД}*}^8}{2\left(\alpha + \beta \Psi_{\text{ПРЕД}*}^4 + \xi \Psi_{\text{ПРЕД}*}^8\right)} \right] \Psi_{\text{ПРЕД}} \cdot I_{\text{ПРЕД}}. \end{aligned}$$

С учетом (3.12) и (3.13) получим:

$$\begin{aligned} A_{\text{ПРЕД}*} &= \frac{A_{\text{ПРЕД}}}{\Psi_{\text{ПРЕД}} \cdot I_{\text{ПРЕД}}} = 0,5 \frac{1}{L_{\text{Н}*}} \sqrt[2]{-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \frac{1}{\xi} \left(\alpha - \frac{B_B}{\mu\mu_0 L_{\text{Н}*}}\right)}} - \\ &- 0,5 \frac{\alpha + \frac{\beta}{3} \left(-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \frac{1}{\xi} \left(\alpha - \frac{B_B}{\mu\mu_0 L_{\text{Н}*}}\right)}\right) + \frac{\xi}{5} \left(-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \frac{1}{\xi} \left(\alpha - \frac{B_B}{\mu\mu_0 L_{\text{Н}*}}\right)}\right)^2}{\alpha + \beta \left(-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \frac{1}{\xi} \left(\alpha - \frac{B_B}{\mu\mu_0 L_{\text{Н}*}}\right)}\right) + \xi \left(-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \frac{1}{\xi} \left(\alpha - \frac{B_B}{\mu\mu_0 L_{\text{Н}*}}\right)}\right)^2}. \quad (3.14) \end{aligned}$$

В (3.14) подставим найденное ранее выражение для  $\mu$  [98]:

$$\mu = \frac{B_B}{\mu_0 \left(\alpha + \beta \Psi_*^4 + \xi \Psi_*^8\right)}.$$

Окончательно получим для  $\Psi_* = \Psi_{\text{ПРЕД}*}$  предельную механическую работу:

$$A_{\text{ПРЕД}^*} = \frac{0,5}{L_{\text{Н}^*}} \sqrt{-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - Q}} - 0,5 \frac{\alpha + \frac{\beta}{3} \left( -\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - Q} \right) + \frac{\xi}{5} \left( -\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \frac{1}{\xi} Q} \right)^2}{\alpha + \beta \cdot Z + \xi \cdot Z^2}, \quad (3.15)$$

$$\text{где } Q = \frac{\alpha}{\xi} - \frac{(\alpha + \beta \Psi_{\text{ПРЕД}^*}^4 + \xi \Psi_{\text{ПРЕД}^*}^8)}{\xi L_{\text{Н}^*}}; \quad Z = -\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \frac{1}{\xi} \left( \alpha - \frac{B_B}{\mu\mu_0 L_{\text{Н}^*}} \right)}.$$

Исследуем влияние обобщенного параметра  $\Theta_{\text{н}}$  на величину  $A_{\text{ПРЕД}}$ . Для этого заменим в (3.15)  $L_{\text{Н}^*}$  на  $\text{tg}\Theta_{\text{н}}$  и используем значения коэффициентов аппроксимации применительно к конструкционной стали марки Ст3, из которой изготовлен магнитопровод импульсного ЛЭМД [9; 54]. Дополнительно примем  $\Psi_{\text{ПРЕД}^*} = 2$ , что соответствует максимальному значению индукции  $B_{\text{ПРЕД}} = 2$  Тл магнитопровода из стали Ст3.

На рисунке 3.8 представлена зависимость предельной механической работы  $A_{\text{ПРЕД}}$  от параметра  $\Theta_{\text{н}}$ .

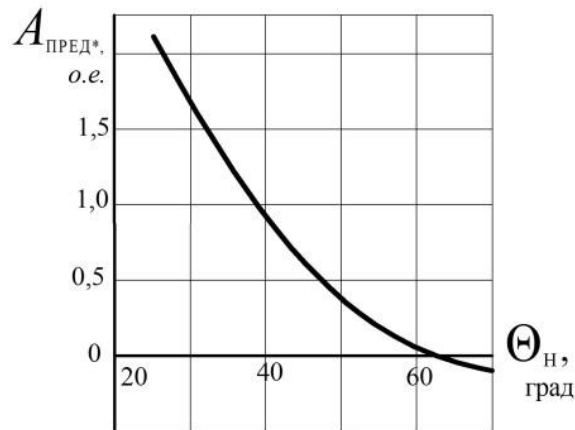


Рисунок 3.8 – Влияние  $\Theta_{\text{н}}$  на предельную механическую работу  $A_{\text{ПРЕД}^*}$

Видим, что при изменении параметра  $\Theta_{\text{н}}$  от  $45^\circ$  до  $25^\circ$ , что соответствует переходу от одноззорной магнитной системы к двухззорной, величина предельной механической работы возрастает в три и более раза. Поэтому появляются предпосылки ожидать увеличения удельной энергии рабочего хода импульсных ЛЭМД. Кроме того, выяснилось, что для стали Ст3 углы  $\Theta_{\text{н}} > 60^\circ$ , соответствующие одноззорным конструкциям с небольшой кратностью изменения индуктивности, не обеспечивают необходимого запаса магнитной энергии в рабо-

чих зазорах.

Полученное выражение (3.15) позволит оценить влияние материала магнитопровода, степени его насыщения и начальной индуктивности  $L_H$  на величину предельной механической работы, реализованной с помощью устройства удержания якоря [9; 18; 19; 50; 78; 95; 102; 106].

С помощью предложенной аппроксимации кривой намагничивания магнитопровода преобразователя степенным полиномом девятой степени аналитически получена зависимость предельной механической работы от конструктивных параметров преобразователя. Это позволило оценить влияние начальной индуктивности преобразователя и степени насыщения на запасаемую магнитную энергию, преобразуемую в механическую работу.

### **3.4 Оценка эффективности способов концентрации магнитной энергии в импульсных ЛЭМД**

Рабочей приводной средой в импульсных ЛЭМД является магнитное поле, и от уровня его концентрации в объёме рабочих зазоров зависит уровень механической энергии, преобразованной из магнитной. Поэтому для таких двигателей актуальной является оценка эффективности двух основных путей решения этой задачи: во-первых, аккумулирование магнитной энергии с помощью так называемых устройств, удерживающих движение якоря ЛЭМД на этапе его трогания при рабочем ходе, и, во-вторых, форсированное питание обмотки возбуждения двигателя.

Оценим регулировочные свойства обоих способов концентрации магнитной энергии за счёт изменения тока трогания с помощью устройства удержания якоря (УЯ) для первого способа и изменения напряжения питания — для второго.

Первый способ осуществляется за счет подачи номинального напряжения  $U$  источника при одновременном нагружении якоря статическим противодействующим усилием, которое падает скачком до нуля с началом движения якоря [88; 108]. При указанном алгоритме питания импульсного ЛЭМД потери от вих-

ревых токов находятся в заданных пределах, а ток трогания за счёт введения в конструкцию двигателя устройства УЯ меняется в диапазоне от нуля до  $I_{уст}$ . Такое регулирование тока трогания позволяет изменять начальное тяговое усилие двигателя и также его выходные параметры [9; 106; 109].

Второй способ осуществляется за счет подачи повышенного (форсированного) напряжения источника  $U_{\phi} = k_{\phi} \cdot U$ , где  $k_{\phi} > 1$  – коэффициент форсировки по напряжению при отсутствии такого статического нагружения.

В работе [110] было проведено сравнение указанных способов с позиции форсированного накопления магнитной энергии, когда ток трогания  $I_{тр}$  равен предельному установившемуся значению  $I_{уст} = U/R$  при напряжении  $U$  источника.

Для сравнения этих способов выясним, при каких условиях происходит начало движения якоря. Для корректности сравнения примем, что двигатели имеют одинаковую конфигурацию магнитной системы, размеры, массу подвижных частей, начальные индуктивности  $L_H$  и сопротивления обмоток, материалы магнитопровода также одинаковы. Сравнение ведём при одинаковых значениях начального тягового усилия и начальных зазоров. Тогда из-за идентичности сравниваемых ЛЭМД начальное тяговое усилие будет являться только функцией тока трогания [108-110]. Законы изменения токов через обмотки возбуждения двигателей на этапе трогания для первого  $i_{уд}(t)$  и второго  $i_{\phi}(t)$  способов описываются следующими уравнениями соответственно:

$$i_{уд} = \frac{U}{R} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_H}} \right); \quad (3.16)$$

$$i_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{R} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_H}} \right) = \frac{k_{\phi} U}{R} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_H}} \right), \quad (3.17)$$

где  $\tau_H = \frac{L_H}{R}$  – электромагнитная постоянная времени, соответствующая начальному неподвижному положению якоря.

Так как начальное тяговое усилие импульсного ЛЭМД при прочих одина-

ковых условиях определяется величиной тока трогания [9], то этот ток в первом случае задаётся устройством УЯ и изменяется в диапазоне  $0 < I_{\text{тр}} < I_{\text{уст}}$ , а во втором – пропорционально величине  $U_{\text{ф}}$  источника. При этом одинаковому току трогания, следовательно, и одинаковому начальному тяговому усилию для рассматриваемых случаев будут соответствовать следующие значения, полученные из (3.16) и (3.17):

$$I_{\text{уд.тр}} = I_{\text{тр}*} \cdot \frac{U}{R}; \quad (3.18)$$

$$I_{\text{ф.тр}} = \frac{k_{\text{ф}} U}{R} \cdot (1 - e^{-t_{\text{тр}*}}), \quad (3.19)$$

где  $t_{\text{тр}*} = t_{\text{тр}}/\tau_{\text{н}} = t_{\text{тр}} \cdot L_{\text{н}}/R$  – относительное время трогания, определяющее быстродействие;  $I_{\text{тр}*} = I_{\text{тр}}/I_{\text{уст}}$  – относительный ток обмотки возбуждения.

Приравняв правые части (3.18) и (3.19), получим выражение для коэффициента форсировки по напряжению:

$$k_{\text{ф}} = \frac{I_{\text{тр}*}}{(1 - e^{-t_{\text{тр}*}})} = f(I_{\text{тр}*}; t_{\text{тр}*}). \quad (3.20)$$

На рисунке 3.9 представлено семейство зависимостей по (3.20).

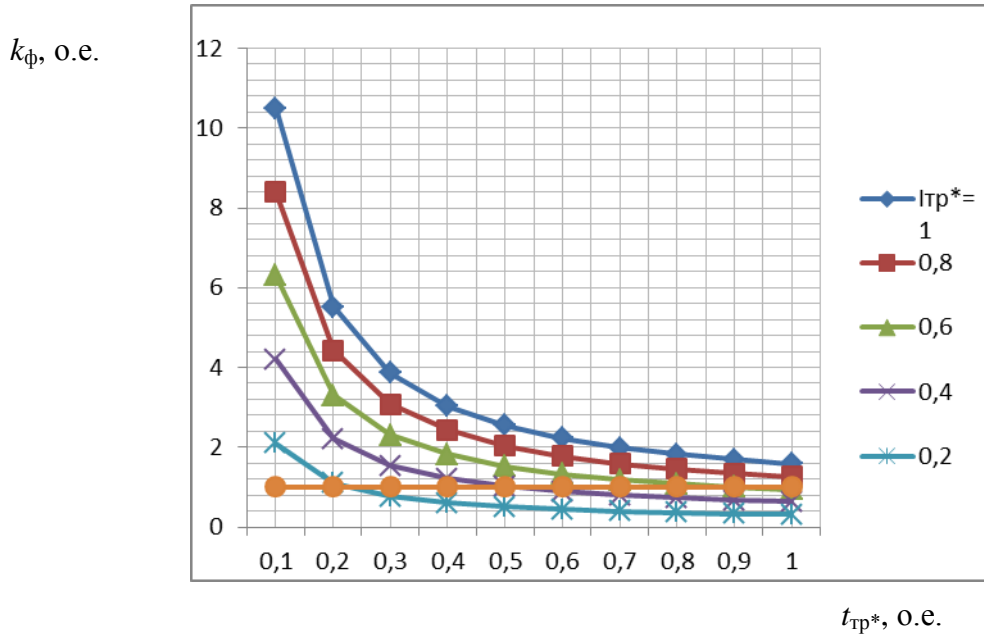


Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента форсировки от времени трогания при различных значениях тока трогания



В работе [110] получены выражение и график зависимости коэффициента форсировки по напряжению только для одного значения тока трогания  $I_{тр*}=1$ , которые являются частным случаем формулы (3.20) и семейства графиков (Рисунок 3.9) для значений  $0 < I_{тр} < I_{уст}$ . Указанный диапазон изменения тока трогания и соответственно начального тягового усилия необходим, прежде всего, для регулирования выходных параметров импульсных ЛЭМД в приводе различного технологического оборудования.

Из рисунка 3.9 следует, что во всём диапазоне изменения  $t_{тр*}$  для первого способа форсировка по напряжению отсутствует, в то время как для второго способа при изменении времени  $t_{тр*}$  от 0,5 до 1 возникает необходимость в (1,2...2,5)-кратном повышении питающего напряжения для получения токов трогания, превышающих значение  $I_{тр*} = 0,6$ . Однако процесс такой форсировки предполагает быстрое увеличение запаса магнитной энергии рабочих зазоров импульсного ЛЭМД, что неизбежно ведёт к значительным потерям энергии в массивном магнитопроводе двигателя от вихревых токов. В результате снижается КПД импульсного ЛЭМД и замедляется изменение тока в его обмотке за счёт образования вторичных короткозамкнутых контуров.

Для импульсных линейных электромагнитных двигателей, используемых в приводе технологического оборудования, получено выражение коэффициента форсировки по напряжению и показано преимущество использования способа концентрации магнитной энергии рабочих зазоров путём нагружения якоря на этапе его трогания статическим противодействующим усилием по отношению к способу форсировки при питании от источника повышенного напряжения. Предлагаемый выше способ нагружения, реализуемый импульсным ЛЭМД с устройством УЯ, позволяет значительно улучшить энергетику процессов [9; 88; 102; 107; 108]. Несмотря на увеличение времени трогания якоря, время его рабочего хода сокращается за счёт значительного уменьшения времени движения якоря, что не ухудшает динамических характеристик двигателя и привода.

В результате сравнения способов концентрации магнитной энергии рабочих зазоров импульсных ЛЭМД в редкоударных электромагнитных машинах

выявлены преимущества способа статического нагружения двигателя перед способом его форсированного питания.

### Выводы

1. Впервые в электромеханическом преобразователе электромагнитного типа структурно разделены потоки энергий как между электрической и магнитной, так и между механической и магнитной подсистемами.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена необходимость начала рабочего хода импульсного ЛЭМД лишь после предварительного накопления на этапе трогания необходимой магнитной энергии, максимальная величина которой при прочих равных условиях зависит от обобщенного конструктивного параметра  $\Theta_n$ , определяемого количеством рабочих воздушных зазоров и величиной рабочего хода, так и от режимного параметра – тока трогания. Показано, что при изменении конструктивного параметра  $\Theta_n$ , например, от  $45^\circ$  до  $20^\circ$ , максимально возможная величина накопленной на этапе трогания магнитной энергии возрастает в 3,6 раза.

3. Установлено, что предельная механическая работа в виде магнитной энергии, накопленной в рабочих зазорах ЛЭМД, зависит от степени насыщения материала магнитопровода и начальной индуктивности  $L_H$ .

4. Для редкоударных электромагнитных машин выявлены преимущества способа статического нагружения двигателя перед способом его форсированного питания.

## ГЛАВА 4. РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

### 4.1 Энергетические режимы импульсного ЛЭМД

В предыдущей главе было установлено структурное разделение потоков энергии между тремя подсистемами: электрической, магнитной и механической, что позволило выявить 16 различных энергетических режимов электромагнитного и электромеханического преобразования энергии в импульсном ЛЭМД.

При оценке влияния процесса электромагнитного преобразования и аккумуляции магнитной энергии в рабочих зазорах двигателя на энергетические режимы последующего электромеханического преобразования исследуем поведение рабочей точки на энергетической плоскости «потокосцепление - ток». Площадь на ней пропорциональна энергии, накопленной в магнитной системе ЛЭМД. Точка *A* (Рисунок 4.1) при движении якоря своей траекторией на плоскости «потокосцепление - ток» завершает описывать за цикл работы двигателя определенную замкнутую фигуру, ограниченную начальной и конечной магнитными характеристиками, площадь которой пропорциональна механической работе [13; 16; 99; 111].

Основные допущения при рассмотрении процессов электромагнитного и электромеханического преобразования энергии в импульсном ЛЭМД следующие: при начальном воздушном зазоре  $\delta_n \neq 0$  магнитная система не является насыщенной, при зазоре  $\delta'_n$ , превышающем начальный зазор  $\delta_n$ , она также не насыщена ( $\delta'_n > \delta_n$ ), а при зазоре  $\delta_n$ , близком к нулю, магнитная система насыщена. Кроме того, магнитная цепь ЛЭМД не имеет внутренних потерь и потоков рассеяния [13; 99; 111]. Магнитные характеристики для насыщенной ( $\delta = 0$ ) и не насыщенных магнитных систем для  $\delta_n$  и  $\delta'_n$  приведены на рисунке 4.1. На энергетической плоскости  $\Psi - i$  представлены секторы и границы между ними, соответствующие шестнадцати энергетическим режимам импульсного ЭМП электромагнитного типа (на рисунке режимы указаны в кружках).

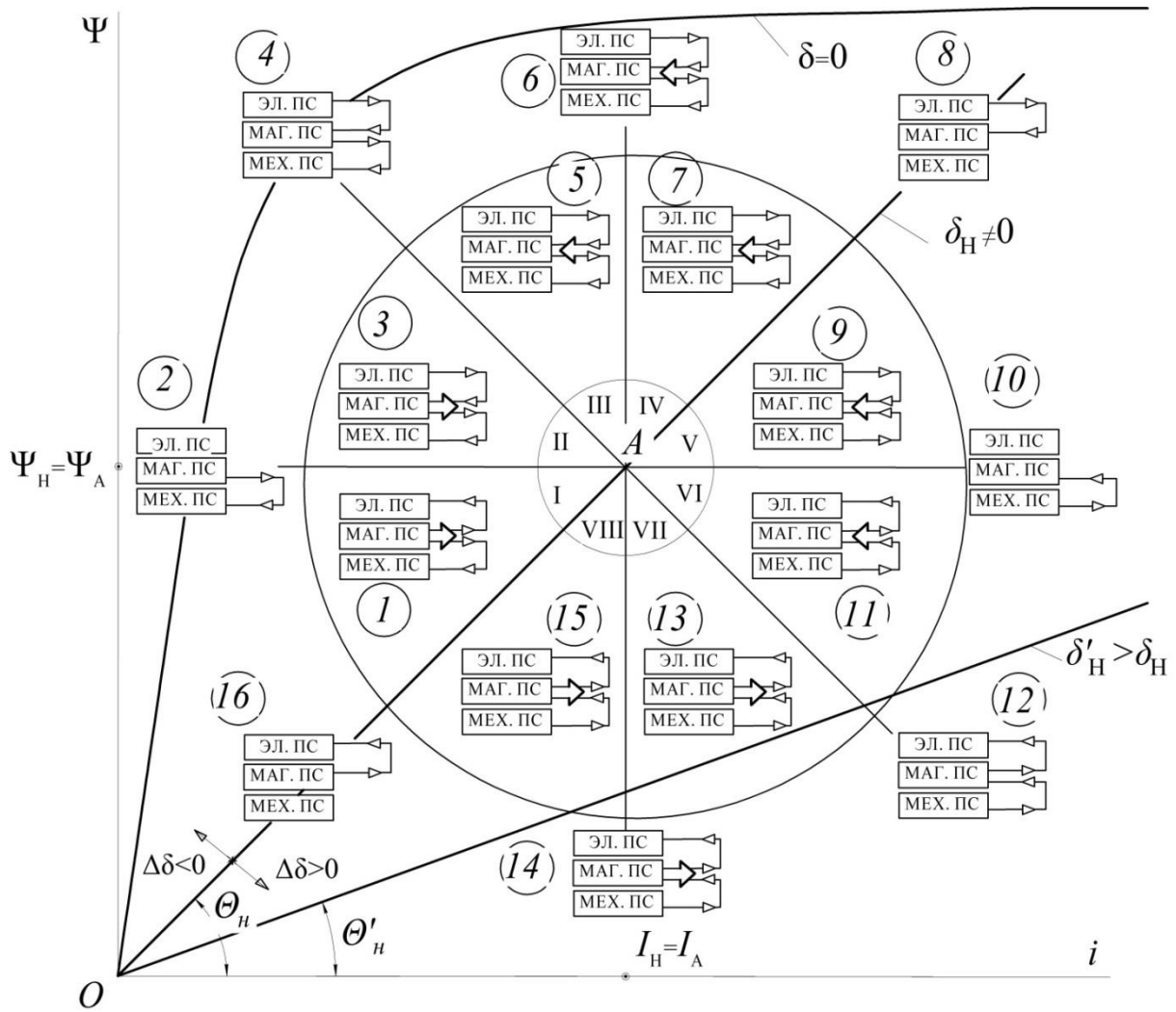


Рисунок 4.1 – Энергетические режимы импульсного ЛЭМД

Наиболее интересными являются энергетические режимы, так или иначе связанные с двигательным режимом, на наш взгляд, основным для ЭМП, когда магнитная энергия рабочих зазоров преобразуется при движении якоря в механическую работу, а приращение рабочего зазора  $d\delta < 0$ . К этим режимам, находящимся выше магнитной характеристики для начального зазора  $\delta_H$  (и для начального угла  $\Theta_H$ ) и ограниченным нелинейной магнитной характеристикой, соответствующей нулевому рабочему зазору, относятся режимы 1-7 (секторы I-IV), для которых приращение механической работы положительно. Для магнитной подсистемы, как центральной, преобразование магнитной энергии в механическую происходит при различных направлениях потоков энергии между

магнитной и электрической подсистемами.

Классификация энергетических режимов электромагнита была впервые представлена в работе [16], где было отмечено, что энергетические режимы работы электромагнита в качестве электромагнитного двигателя, используемого для совершения механической работы, отличаются друг от друга степенью восстановления магнитной энергии при движении якоря. Эта мысль на протяжении многих лет не находила своего развития применительно к теории энергопреобразования электромагнита. Однако еще в тридцатые годы прошлого века Е.Я. Семичовым [112], учеником академика В.Ф. Миткевича, был предложен критерий в виде коэффициента восстановления магнитной энергии при движении якоря электромагнита, который, на наш взгляд, выступает как инструмент для разграничения энергетических режимов электромагнитного двигателя. В последующих работах [99; 111; 113-115] эта идея применения указанного критерия нами была развита и использована для исследования процессов энергопреобразования импульсного ЛЭМД.

Итак, степень восстановления магнитной энергии удобно оценивать с помощью коэффициента восстановления  $k_B$  [111-113]:

$$k_B = \frac{dW_{\text{м.дв}}}{dA} \approx \frac{\Delta W_{\text{м.дв}}}{\Delta A}, \quad (4.1)$$

где  $\Delta W_{\text{м.дв}}$  – изменение (приращение) магнитной энергии, сконцентрированной в магнитной системе импульсного ЛЭМД при движении якоря, когда изменение (приращение) механической работы  $\Delta A$  считается положительным и происходит за счет электромагнитного тягового усилия при уменьшающемся рабочем воздушном зазоре ( $\Delta\delta < 0$ ). Также прием положительным направление потока энергии из электрической ПС в магнитную ПС [111].

Поскольку направление потока энергии между магнитной и электрической подсистемами определяется величиной и знаком приращения потокосцепления  $\Delta\Psi$ , то режим работы импульсного ЛЭМД определится знаком и величиной приращения потокосцепления при различных значениях коэффициента восстановления  $k_B$  и знаком приращения рабочего воздушного зазора на этапе движе-

ния якоря. Указанные изменения потокосцепления  $\Delta\Psi$  и рабочего воздушного зазора  $\Delta\delta$  будут определять изменения тока обмотки возбуждения  $\Delta i$  и электромагнитного тягового усилия для каждого энергетического режима. Причем запас начальной магнитной энергии  $W_{\text{мн}}$  будет влиять на механическую работу для режимов 1-7 и на величину генерируемой в источник электрической энергии для режимов 9-15. Знаки приращений потокосцепления  $\Delta\Psi$ , тока возбуждения  $\Delta i$  и рабочего зазора  $\Delta\delta$  указаны на рисунке 4.1.

Режим электромагнитного преобразования энергии, начинаясь в точке  $O$ , заканчивается в точке  $A$  на магнитной характеристике импульсного ЛЭМД для начального рабочего зазора  $\delta_{\text{н}}$ . В точке  $A$  в рабочих зазорах аккумулируется начальная магнитная энергия  $W_{\text{мн}}$ :

$$W_{\text{мн}} = \int_0^{\Psi_{\text{н}}} i(\psi) d\psi, \quad (4.2)$$

с которой от точки  $A$  начинается электромеханическое преобразование энергии, когда за время рабочего хода импульсный ЛЭМД последовательно может находиться в одном из нескольких энергетических режимов 1-7.

Энергетический режим определяется тяговой характеристикой двигателя, противодействующей характеристикой нагрузки, устройством питания и управления и характеристиками (жесткостью) источника питания.

В работах [99; 114; 116-120] были получены и сравнены между собой режимы 1-7 (Рисунок 4.1) по ряду предложенных энергетических критериев: по механической работе  $A$ , магнитному КПД  $\eta_{\text{м}}$ , остаточной магнитной энергии  $W_{\text{мо}}$ , коэффициенту эффективности цикла  $\eta_{\text{ц}}$ . При сравнении режимов по этим критериям предполагалось, что при неучете насыщения магнитной системы линия динамического перехода каждого из режимов 1-7 представляла собой прямую, которая начинается в точке  $A$  для начального зазора  $\delta_{\text{н}}$  и заканчивается в соответствующей точке одного из режимов 1-7 для конечного зазора  $\delta = 0$ .

В секторе I (энергетический режим 1) кроме преобразования одной части магнитной энергии рабочих зазоров в механическую (двигательный режим) одновременно происходит и обратный процесс преобразования другой оставшейся

части магнитной энергии в электрическую (генераторный режим).

В итоге энергопреобразование в секторе I мы называем совмещенным режимом, который относим к специальным режимам ЭМП [114]. Очевидно, что генераторный режим для импульсного ЛЭМД, работающего в совмещенной режиме, не является целью, следовательно, нежелателен.

Поскольку для режима 1 направление потока энергии из магнитной ПС в электрическую отрицательное, а  $|\Delta A| < |\Delta W_{\text{м.дв}}|$ , то коэффициент восстановления магнитной энергии будет находиться в следующих пределах:

$$-\infty < k_{\text{в}} < -1,$$

что свидетельствует не о приращении (накоплении) энергии в магнитной ПС, а о её ослаблении (уменьшении).

Отмеченный выше режим 1 рассматривался на энергетической плоскости  $\Psi-i$  в работах [19; 116; 118]. В целом он является неэффективным режимом как для двигательного, так и для генераторного режимов в составе совмещенного режима как при питании импульсного ЛЭМД от сети переменного напряжения [116], так и при конденсаторном питании [19]. Режим 1 не способен обеспечить высоких значений механической работы, несмотря даже на использование в конструкции двигателя устройства УЯ [19].

Генераторный режим в составе совмещенного режима 1 обеспечивается за счет рекуперации части магнитной энергии при продолжении протекания тока двигателя через последний находящийся в работе вентиль выпрямителя и при отрицательном напряжении сети. В работе [116] показано, что уровень рекуперированной в источник питания электрической энергии возможно регулировать, правда, в нешироких пределах.

Следует отметить, что в режиме 1 наряду с прямым потоком энергии из магнитной ПС в механическую ПС идет обратный поток энергии из магнитной ПС в электрическую, вызывающий в реальной ситуации потери энергии, как в обмотке возбуждения, так и во внутреннем сопротивлении источника. Поэтому режим 1 целесообразно использовать в течение одного или нескольких циклов для перехода от высоких значений энергии рабочего хода к низким значениям.

Так, возможно осуществить быстрое уменьшение (гашение) остаточной магнитной энергии за время, не превышающее, как показано в работе [9], половину периода промышленной сети переменного напряжения, то есть за 0,01с.

Как и для режима 1, электромеханическое преобразование для энергетического режима 2 с неизменным потокоцеплением (граница секторов I и II, Рисунок 4.1) осуществляется за счет запаса начальной магнитной энергии  $W_{\text{мн}}$ . Поскольку в режиме 2 вся магнитная энергия  $W_{\text{мн}}$ , запасаемая на этапе электромагнитного преобразования и соответствующая точке A за исключением остаточной магнитной энергии  $W_{\text{мо}}$ , преобразуется в механическую работу, то очевидно, что по критерию «механическая работа» режим 2 уже превосходит рассмотренный выше режим 1 в случае равенства начальных магнитных энергий.

Особенностью режима 2 является отсутствие электрической связи импульсного ЛЭМД с источником питания и, следовательно, невозможность рекуперации части магнитной энергии в виде обратного потока электрической энергии в источник. Указанная особенность этого режима затрудняет его практическую реализацию и сводит ее, например, к такому алгоритму, когда сразу после начала движения якоря из точки A (Рисунок 4.1) необходимо уменьшить напряжение источника питания. После этого за счет ЭДС самоиндукции, превышающей напряжение источника, обмотка возбуждения двигателя оказывается зашунтированной обратным диодом, через который теперь замыкается уменьшающийся ток двигателя.

По такому алгоритму, например, работает электромагнитный привод сейсмоисточника, электромагнитный двигатель которого питается от заряженного конденсатора [117]. Его заряд начинается на этапе электромагнитного преобразования двигателя за счет подачи на разряженный конденсатор форсированного напряжения, после уменьшения которого двигатель теряет электрическую связь с источником питания. Электромеханическое преобразование происходит за счет накопленной на этапе трогания начальной магнитной энергии  $W_{\text{мн}}$ . Реализация режима 2 по такому алгоритму отличается простотой. Однако резкие изменения магнитной индукции в магнитопроводе из-за форсировки вызывают



значительные потери от вихревых токов и снижают быстродействие привода вследствие образования вторичных замкнутых контуров с током. Все это требует обязательного шихтования магнитопровода и ведет к усложнению конструкции двигателя.

Если энергопреобразование по режиму 1 осуществляется лишь на части рабочего хода якоря импульсного ЛЭМД (либо в начале, либо в конце рабочего хода), а остальные стадии рабочего хода проходят по другим режимам, то режим 2 занимает обычно весь рабочий ход. Это объясняется тем, что электрическая связь с источником у обмотки возбуждения, как было показано выше, отсутствует. Ток обмотки возбуждения в этом режиме 2 для импульсных ЛЭМД с продольным магнитным полем падает в течение всего хода якоря линейно, что может быть показано теоретически и подтверждено экспериментом [117].

В целом режим 2, как будет показано в следующих разделах, оказывается весьма энергоэффективным, особенно для современных двух- и трехзачорных конструкций магнитной системы с встроенным устройством удержания якоря [18; 106], которые не требуют обязательного шихтования статора.

Поскольку для режима 2 имеем  $|\Delta A| = |\Delta W_{\text{м.дв}}|$ , а  $\Delta W_{\text{м.дв}} < 0$ , то коэффициент восстановления магнитной энергии будет  $k_b = -1$ .

Энергетический режим 3 характерен для сектора II (Рисунок 4.1) и осуществляется в основном за счет накопленной на этапе трогания начальной магнитной энергии с невысокой степенью восстановления магнитной энергии за счет электрической, потребляемой от источника питания. По мере отдаления от режима 2 и приближения к режиму 4 степень восстановления магнитной энергии для режима 3 растет. Работа двигателя в этом режиме к концу рабочего хода якоря сопровождается ростом потокосцепления и остаточной магнитной энергии, также снижающей магнитный и общий КПД энергопреобразования [99;116; 118;119].

Поскольку для режима 3 существует соотношение  $|\Delta A| > |\Delta W_{\text{м.дв}}|$ , а  $\Delta W_{\text{м.дв}} < 0$ , то коэффициент  $k_b$  будет находиться в пределах  $-1 < k_b < 0$ .

Следует заметить, что накопление магнитной энергии и её восстановление при движении якоря вполне допустимо, однако малоэффективно, поскольку оно сопровождается ростом потокосцепления, при котором возрастает остаточная магнитная энергия, снижающая магнитный КПД за цикл [98; 99; 111; 118]. Кроме того, сам рост потокосцепления в насыщенной магнитной системе ограничен сверху кривой намагничивания стали магнитопровода импульсного ЛЭМД (кривая для  $\delta = 0$ , Рисунок 4.1).

Энергетический режим 4, соответствующий границе секторов II и III, интересен тем, что за счет источника питания в течение рабочего хода происходит полное восстановление магнитной энергии, накопленной на этапе трогания, то есть передача всей электрической энергии в механическую ПС. При этом в магнитной системе двигателя сохраняется одно и то же количество магнитной энергии, то есть приращение магнитной энергии в этом режиме отсутствует ( $\Delta W_{\text{м.дв}} = 0$ ) и коэффициент восстановления магнитной энергии  $k_{\text{в}} = 0$  [111].

В энергетическом режиме 5, соответствующем сектору III (Рисунок 4.1), процесс преобразования в механическую работу магнитной энергии при одновременном ее восстановлении за счет источника питания происходит с увеличением магнитной энергии рабочих зазоров. Однако приращение магнитной энергии  $\Delta W_{\text{м.дв}}$  в этом режиме не превышает приращение механической работы  $\Delta A$  ( $\Delta W_{\text{м.дв}} < \Delta A$ ). Следовательно, коэффициент восстановления магнитной энергии будет находиться в диапазоне  $0 < k_{\text{в}} < 1$  [111].

Следует заметить, что с использованием режимов 3-5 функционируют многие импульсные ЛЭМД [9; 18; 19; 88; 94; 116]. Однако эти режимы характеризуются сравнительно высокими значениями остаточной магнитной энергии, снижающей магнитный и общий КПД двигателя за цикл.

Энергетический режим 6, соответствующий границе секторов III и IV (Рисунок 4.1), наиболее полно описан в [120]. По этому режиму функционируют мощные электромагнитные машины, работающие на потоках рассеяния (молоты) [12; 120]. Особенность режима в том, что в нём источник питания, как и в режиме 5, генерирует энергию не только для совершения механической работы,

но и на одновременное увеличение магнитной энергии системы, причем затрачивает энергии вдвое больше, чем превращается системой в механическую работу, следовательно,  $\Delta W_{\text{м.дв}} = \Delta A$  и коэффициент  $k_{\text{в}} = 1$ . Следовательно, режим 6 характерен значительной реактивной мощностью из-за сравнительно большого потока энергии, поступающей из электрической ПС в магнитную ПС при движения и снижающей коэффициент мощности импульсного ЛЭМД.

Наконец, энергетический режим 7 (сектор IV, Рисунок 4.1) характеризуется самым большим значением  $k_{\text{в}}$ , то есть за рабочий ход в основном накапливается в зазорах магнитная энергия и по отношению к ней совершается незначительная механическая работа. Как для режима 1 неэффективно рекуперировать магнитную энергию в источник питания, так и для режима 7 неэффективно бесполезно накапливать магнитную энергию, понижая при этом коэффициент мощности импульсного ЛЭМД. Следовательно, энергоэффективные режимы импульсных ЛЭМД будут находиться в диапазоне от второго до шестого режимов.

В режиме 8, несмотря на рост тока и потокосцепления, а также на возрастающее начальное тяговое усилие, отсутствует движение якоря из-за фиксации его положения, что представляет собой режим электромагнитного преобразования энергии. Этот режим характеризуется значительной остаточной магнитной энергией в магнитной системе двигателя, снижающей его коэффициент мощности из-за последующей рекуперации энергии в источник питания. Для данного статического режима коэффициент восстановления определить невозможно, поскольку в выражении (4.1) приращение  $\Delta W_{\text{м.дв}} = 0$  из-за отсутствия движения якоря, и по той же причине приращение механической работы  $\Delta A = 0$ . В результате при нахождении  $k_{\text{в}}$  получается неопределенность вида 0/0.

Кратко рассмотрим энергетические режимы импульсного ЛЭМД, так или иначе связанные благодаря свойству обратимости ЭМП с генераторным режимом, при которых магнитная энергия рабочих зазоров преобразуется при движении якоря за счет электромагнитных сил в электрическую энергию, когда приращение рабочего зазора положительно, то есть  $\Delta \delta > 0$ . Это будут режимы, находящиеся под магнитной характеристикой (Рисунок 4.1) для начального ра-

бочего зазора  $\delta_n$  и ограниченные магнитной характеристикой, соответствующей увеличенному рабочему зазору  $\delta'_n$  ( $\delta'_n > \delta_n$ ). Для этого в качестве инструмента исследования режимов, как и в выражении (4.1), будем использовать соотношения между приращениями магнитной энергии и механической работы.

Физически коэффициент восстановления магнитной энергии по выражению (4.1) характеризует процесс изменения энергии магнитного поля импульсного ЛЭМД при совершении им механической работы в двигательном режиме ( $\Delta A > 0$ ) за счет электромагнитного тягового усилия при уменьшающемся рабочем зазоре ( $\Delta \delta < 0$ ).

Для двигательного режима работы импульсного ЛЭМД, когда  $\Delta A > 0$  и  $\Delta \delta < 0$ , положительные значения  $k_v$  свидетельствуют о накоплении магнитной энергии при движении якоря, то есть о заряде индуктивного накопителя, когда  $\Delta W_{м.дв} > 0$ . Отрицательные же значения коэффициента  $k_v$  обозначают уменьшение магнитной энергии рабочих зазоров, то есть процесс разряда индуктивного накопителя, когда  $\Delta W_{м.дв} < 0$ .

Однако для генераторного режима, когда за счет сторонней механической энергии приращения механической работы и рабочего зазора будут  $\Delta A < 0$  и  $\Delta \delta > 0$ , использование соотношения между приращениями магнитной энергии и механической работы, как коэффициента восстановления, искажает физическую картину процесса энергопреобразования. Например, при отрицательном приращении магнитной энергии ( $\Delta W_{м.дв} < 0$ ), когда происходит уменьшение запаса энергии магнитного поля в рабочих зазорах, коэффициент, найденный по выражению (4.1) для отрицательных значений  $\Delta W_{м.дв}$  и  $\Delta A$ , будет положительным, что неверно иллюстрирует процесс энергопреобразования. Поэтому целесообразно для генераторного режима для соотношения между приращениями магнитной энергии и механической работы ввести коэффициент ослабления магнитной энергии  $k_{ос}$ , который по форме будет совпадать с правой частью выражения (4.1):

$$k_{ос} = \frac{dW_{м.дв}}{dA} \approx \frac{\Delta W_{м.дв}}{\Delta A} \Big|_{\Delta A < 0, \Delta \delta > 0}. \quad (4.3)$$

Однако применять выражение (4.3) следует только для значений  $\Delta A < 0$  и  $\Delta \delta > 0$ , то есть для генераторного режима импульсного ЛЭМД (режимы 9...15).

Тогда выражение (4.1) следует применять только для двигательного режима импульсного ЛЭМД (энергетические режимы 1...7), когда  $\Delta A > 0$  и  $\Delta \delta < 0$ :

$$k_B = \frac{dW_{\text{м.дв}}}{dA} \approx \frac{\Delta W_{\text{м.дв}}}{\Delta A} \bigg|_{\Delta A > 0, \Delta \delta < 0}. \quad (4.4)$$

Применим выражение (4.3) для характеристики энергетических режимов 9...15 генераторного режима импульсного ЛЭМД.

Энергетический режим 9, соответствующий сектору V (Рисунок 4.1), как и режим 1, будет совмещенным режимом [114]. В нем происходит потребление от источника электрической энергии, сопровождающееся ростом потокосцепления, и преобразование ее в магнитную энергию рабочих зазоров. Одновременно происходит потребление механической энергии стороннего источника и преобразование ее так же в энергию магнитного поля магнитной ПС. Поскольку приращение магнитной энергии в этом режиме положительно ( $\Delta W_{\text{м.дв}} > 0$ ), а приращение механической работы отрицательно ( $\Delta A < 0$ ), причем для модулей будет  $|\Delta A| > |\Delta W_{\text{м.дв}}|$ , то коэффициент ослабления магнитной энергии становится отрицательным и находится в диапазоне:

$$-\infty < k_{\text{ос}} < -1,$$

что свидетельствует не об ослаблении, а о накоплении энергии в магнитной ПС.

Энергетический режим 10, соответствующий границе секторов V и VI, происходит с неизменным потокосцеплением, когда связь с электрической ПС отсутствует. Как и для режима 2, соотношение между модулями приращений механической работы и магнитной энергии следующее:  $|\Delta A| = |\Delta W_{\text{м.дв}}|$ , причем происходит накопление магнитной энергии в рабочих зазорах за счет механической энергии стороннего источника, то есть  $\Delta A < 0$ , а  $\Delta W_{\text{м.дв}} > 0$ . Следовательно, коэффициент ослабления магнитной энергии будет отрицательным и равным:

$$k_{\text{ос}} = -1,$$

что также свидетельствует о накоплении энергии в магнитной ПС двигателя.

Энергетический режим 11, соответствующий сектору VI (Рисунок 4.1), в отличие от режима 3 происходит при падающем потокоцеплении, что соответствует рекуперации в электрическую ПС части механической энергии стороннего источника. Другая часть этой энергии запасается в магнитной ПС, то есть  $\Delta W_{\text{м.дв}} > 0$ . Так как  $|\Delta A| > |\Delta W_{\text{м.дв}}|$ , то диапазон изменения коэффициента ослабления магнитной энергии, отрицательного по значению, будет:

$$-1 < k_{\text{ос}} < 0.$$

Энергетический режим 12, соответствующий границе секторов VI и VII, происходит при неизменной магнитной энергии рабочих зазоров ( $\Delta W_{\text{м.дв}} = 0$ ) и падающем потокоцеплении, что свидетельствует о рекуперации в электрическую ПС всей механической энергии стороннего источника. Тогда:

$$k_{\text{ос}} = 0.$$

Энергетический режим 13, соответствующий сектору VII, по сравнению с предыдущим режимом характерен бóльшей электрической энергией, генерируемой в электрическую ПС как за счет сторонней механической энергией, так и за счет уменьшающейся магнитной энергии рабочих зазоров. Так как  $|\Delta A| > |\Delta W_{\text{м.дв}}|$  и  $\Delta W_{\text{м.дв}} < 0$ , то диапазон изменения коэффициента ослабления магнитной энергии, положительного по значению, будет:

$$0 < k_{\text{ос}} < 1.$$

Энергетический режим 14, соответствующий границе секторов VII и VIII, характеризуется неизменным током возбуждения и уменьшающимся потокоцеплением. В этом режиме энергия, передаваемая из магнитной ПС в электрическую ПС, в два раза превышает энергию, передаваемую из механической ПС в магнитную ПС. Следовательно, при таком энергопреобразовании запас магнитной энергии падает, то есть индуктивный накопитель разряжается. Поскольку  $\Delta W_{\text{м.дв}} = \Delta A$ , то коэффициент ослабления магнитной энергии будет:

$$k_{\text{ос}} = 1.$$

Энергетический режим 15, находящийся в секторе VIII (Рисунок 4.1), по сравнению с предыдущим режимом характерен еще бóльшей электрической

энергией, генерируемой в электрическую ПС из магнитной ПС, тогда как по отношению к этой энергии из механической ПС в магнитную ПС преобразуется незначительная часть механической энергии стороннего источника. Если  $\Delta W_{\text{м.дв}} > \Delta A$ , то коэффициент ослабления магнитной энергии будет значительным, то есть  $k_{\text{ос}} > 1$ .

Энергетический режим 16, соответствующий границе секторов I и VIII, является статическим режимом. Он представляет собой режим электромагнитного преобразования энергии с падающими потокоцеплением и током возбуждения. В этом режиме энергия, запасаемая в магнитной ПС, возвращается в электрическую ПС, снижая коэффициент мощности импульсного ЛЭМД. В режиме 16 коэффициент ослабления магнитной энергии не определен.

Применение коэффициентов восстановления и ослабления магнитной энергии в магнитной подсистеме импульсного ЛЭМД позволило при известном знаке приращения рабочего зазора  $\Delta\delta$  разделить энергетические режимы соответственно 1...7 (двигательный) и 9...15 (генераторный) один от другого.

Для рассмотренных режимов 1...7 и 9...15 (Рисунок 4.1) соответствующие им значения коэффициентов восстановления и ослабления магнитной энергии представлены в виде таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристика энергетических режимов импульсного ЛЭМД

Ре- жимы	1	2	3	4	5	6	7
$k_{\text{в}}$ ( $\Delta\delta < 0$ )	$-\infty < k_{\text{в}} < -1$	$k_{\text{в}} = -1$	$-1 < k_{\text{в}} < 0$	$k_{\text{в}} = 0$	$0 < k_{\text{в}} < 1$	$k_{\text{в}} = 1$	$+\infty > k_{\text{в}} > 1$
Ре- жимы	9	10	11	12	13	14	15
$k_{\text{ос}}$ ( $\Delta\delta > 0$ )	$-\infty < k_{\text{ос}} < -1$	$k_{\text{ос}} = -1$	$-1 < k_{\text{ос}} < 0$	$k_{\text{ос}} = 0$	$0 < k_{\text{ос}} < 1$	$k_{\text{ос}} = 1$	$+\infty > k_{\text{ос}} > 1$

Два из рассмотренных шестнадцати энергетических режимов работы импульсного ЛЭМД (это режимы 8 и 16) соответствуют режимам возбуждения двигателя, то есть только электромагнитного преобразования энергии без даль-

нейшего электромеханического преобразования, когда рабочая точка перемещается в плоскости «потокосцепление - ток» по магнитной характеристике, соответствующей неизменному начальному рабочему зазору.

С режима электромагнитного преобразования начинаются остальные 14 режимов, предшествующих электромеханическому преобразованию энергии в импульсном ЛЭМД. Очевидно, что электромагнитное преобразование энергии на этапе трогания якоря коренным образом влияет на дальнейший процесс энергопреобразования в импульсном ЛЭМД.

Таким образом, с помощью коэффициента восстановления магнитной энергии выявлены семь энергетических режимов импульсного ЛЭМД, в которых происходит преобразование магнитной энергии рабочих зазоров в механическую работу. Тогда как с помощью коэффициента ослабления магнитной энергии определены еще семь энергетических режимов такого двигателя, в которых эта магнитная энергия преобразуется в электрическую энергию при движении якоря. Также установлены два совмещенных режима, в одном из которых за счет расхода накопленной магнитной энергии одновременно совершается механическая работа и происходит генерация электрической энергии в источник. В другом режиме за счет электрической энергии источника и механической энергии, совершаемой сторонними силами, происходит накопление магнитной энергии в магнитной подсистеме импульсного ЛЭМД. С помощью коэффициентов восстановления и ослабления магнитной энергии рабочих зазоров импульсного ЛЭМД определено место каждого энергетического режима, когда при движении якоря магнитная энергия рабочих зазоров неизменна.

Таким образом, выявлены энергетические режимы импульсного ЛЭМД, отличающиеся между собой степенью восстановления магнитной энергии, сконцентрированной в рабочих зазорах двигателя при движении якоря. Среди них определены такие режимы, при работе по которым импульсный ЛЭМД способен радикально повысить свою удельную механическую работу.

Реализация энергоэффективных режимов с высоким магнитным КПД осуществляется за счет предварительно накопленной магнитной энергии. При



этом возможны два способа реализации.

Первый способ (Рисунок 4.2) реализуется применительно к одиночным ходам якоря, называемый статическим аккумулярованием магнитной энергии, поскольку оно происходит за время трогания при неподвижном якоре.

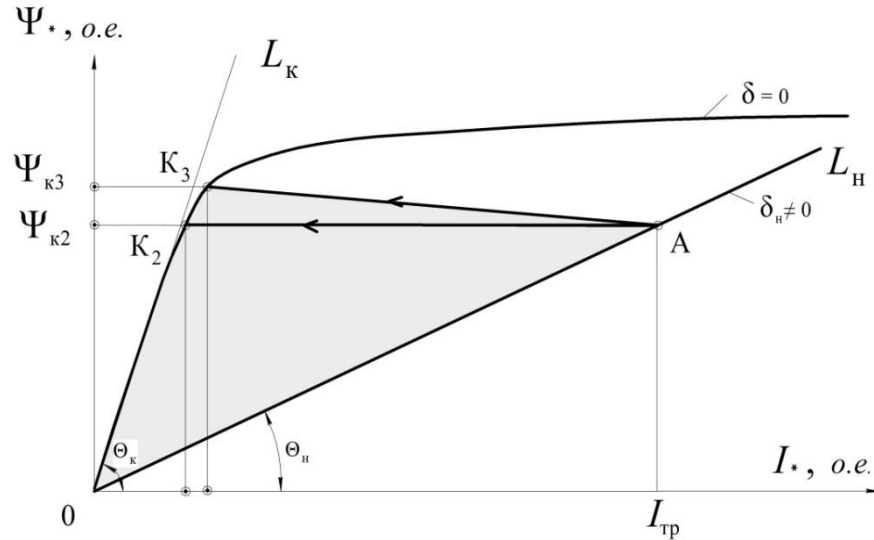


Рисунок 4.2 – Энергетические характеристики импульсного ЛЭМД для режимов 2-3

Наиболее эффективно накопленная магнитная энергия используется в режимах 2 и 3 при уменьшающихся запасах магнитной энергии рабочих зазоров и токе обмотки возбуждения, то есть при  $k_B < 0$ , когда механическая работа значительна, а остаточная магнитная энергия, наоборот, невелика. На рисунке 4.2 механическая работа показана заливкой, а остаточная магнитная энергия – в виде площади фигуры  $OK_2\Psi_{K2}$  для режима 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) или площади  $OK_3\Psi_{K3}$  для режима 3. В таких режимах возможно накопить значительное количество магнитной энергии и эффективно ее преобразовать в механическую работу с высоким магнитным КПД [78;106;119].

Второй способ (Рисунок 4.3) реализуется применительно к серии ходов, и для него первый способ реализации неприемлем из-за отсутствия достаточного времени трогания, в течение которого по первому способу происходило накопление магнитной энергии. Поэтому для аккумулярования магнитной энергии используется часть предыдущего цикла, например, обратного хода якоря (траектория ПА) [18; 93; 121]. Такой процесс накопления, называемый динамическим

аккумуляцией, происходит в 9 и 10 режимах при увеличивающемся рабочем зазоре и возрастающем токе, когда происходит электрическое торможение якоря. На рисунке 4.3 механическая работа также показана заливкой, а остаточная магнитная энергия – в виде тех же площадей  $OK_2\Psi_{K2}$  и  $OK_3\Psi_{K3}$ .

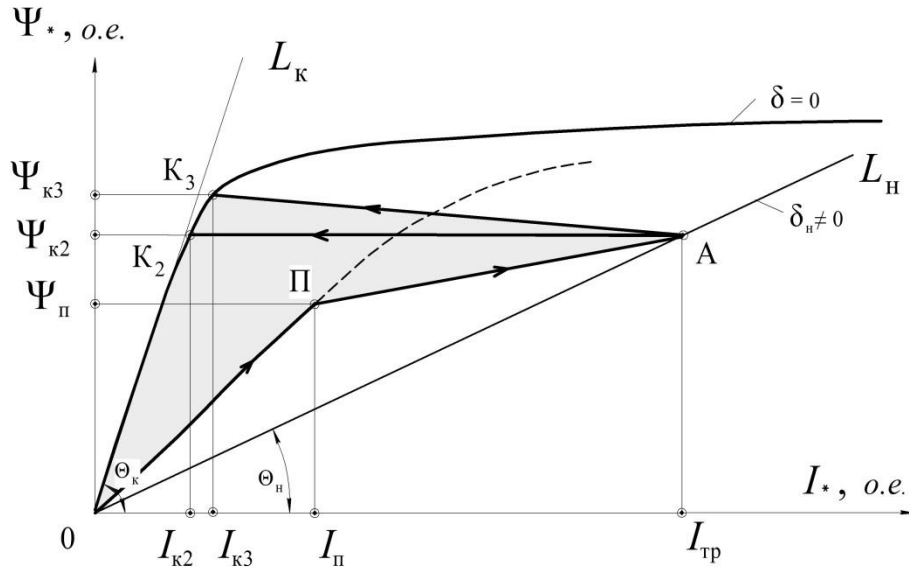


Рисунок 4.3 – Энергетические характеристики импульсного ЛЭМД для режимов 9-10 и 2-3

Таким образом, выявлены 14 энергетических режимов импульсного ЛЭМД, отличающиеся между собой степенью восстановления магнитной энергии, сконцентрированной в рабочих зазорах двигателя при движении якоря. Среди них определены такие режимы, в которых импульсный ЛЭМД способен радикально повысить свою удельную механическую работу. Например, в энергетических режимах 2-3 удельная механическая работа двигателя (энергию удара) возрастает в 2 и более раза, что подтверждено экспериментами.

#### 4.2 Энергетические характеристики электромеханического преобразования энергии в импульсном ЛЭМД при ненасыщенной магнитной системе

Задачи повышения удельных энергетических показателей импульсных ЛЭМД тесно связаны с условиями эффективного энергопреобразования в них, которые позволят обосновать рациональные режимы работы двигателя, его конструктивные параметры и сформулировать требования к устройствам питания и

управления (УПУ). При этом основное внимание уделяется не особенностям конструкции ЛЭМД, а общим закономерностям, присущим всем электромеханическим преобразователям электромагнитного типа.

В работах [13; 99; 118] показано, что, учет всех физических явлений, сопровождающих процесс энергопреобразования, связан с математическими трудностями и не позволяет установить аналитические взаимосвязи между определяющими факторами. С целью упрощения математической формулировки и получения ясности представлений о качественной и количественной сторонах явлений при анализе энергопреобразования примем в виде допущения, что магнитная цепь ЭМП линейна (не насыщена) и идеальна, то есть не имеет внутренних потерь и потоков рассеяния.

Однако необходимо понимать, что при расчетах магнитных характеристик импульсного ЛЭМД у такой ненасыщенной магнитной системы все же должны быть предельные значения магнитной индукции, потокосцепления и магнитного потока, которые служат естественными ограничениями этих величин и не допускают их произвольного превышения. Следовательно, при сравнении энергетических режимов по соответствующим энергетическим критериям оценки эффективности энергопреобразования магнитной энергии в механическую работу следует избегать таких условий, при которых предельные значения будут превышены. Целесообразно в качестве «ограничителя» параметров использовать кривую намагничивания стали магнитопровода импульсного ЛЭМД и показывать ее на энергетической плоскости «потокосцепление – ток».

Известно, что ЛЭМД относятся к двухступенчатым ЭМП. В них на первой ступени энергопреобразования электрическая энергия управляемого источника  $W_{эл}$  преобразуется в магнитную  $W_m$ , образуя прямой поток энергии. Ее обратный поток возникает в случае превращения  $W_m$  в электрическую. При этом энергия  $W_{эл}$  расходуется на потери в обмотке ЭМП от прямого и обратного потоков. Тогда уравнение баланса энергии в магнитной системе ЭМП [13] примет вид:

$$dW_{эл} = R \cdot i_d^2 \cdot dt + dW_m, \quad (4.5)$$

где  $dW_{эл} = u_d \cdot i \cdot dt$ ;  $dW_m = i_d \cdot d\Psi$ ;  $R$ ,  $u_d$ ,  $i_d$ ,  $\Psi$  – сопротивление и мгновенные значения напряжения, тока и потокосцепления обмотки двигателя. Левая часть выражения (4.5) – приращение энергии источника за бесконечно малое время  $dt$ , первый член правой части – потери энергии в обмотке ЭМП за время  $dt$ , второй – приращение магнитной энергии ЭМП, определяемое приращениями потокосцепления и рабочего зазора преобразователя.

На второй ступени энергопреобразования магнитная энергия ЭМП преобразуется в механическую работу. Причем процесс накопления магнитной энергии и ее преобразование в механическую работу разделены во времени [122].

Известно, что энергия магнитного поля является функцией состояния магнитной системы, следовательно, её легко определить графически в виде площади между соответствующими кривыми намагничивания и осью ординат в координатах «потокосцепление – ток». Тогда и работа электромагнитных сил при изменении состояния будет пропорциональна соответствующей площади в этих координатах « $\Psi - i$ » и ограничена линией динамического перехода [13]. В [93] показано, что графическим способом можно определить механическую работу только за полное время движения, когда начальные и конечные точки движения характеризуются неподвижным состоянием. В случае определения работы, совершаемой в течение произвольного интервала динамического процесса, подобный подход дает погрешности.

Согласно [13; 99; 118] магнитная энергия  $W_m$  может быть представлена в виде суммы начальной магнитной энергии  $W_{мн}$ , накопленной в магнитной системе ЭМП к началу движения его якоря, и магнитной энергии  $W_{м.дв}$ , создаваемой на этапе движения якоря, либо в виде суммы механической работы  $A$  и остаточной магнитной энергии  $W_{мо}$ , которая равна энергии магнитной системы после завершения рабочего хода. В результате баланс энергии на второй ступени энергопреобразования можно представить в виде:

$$W_m = W_{мн} + W_{м.дв} = A + W_{мо}.$$

При исследовании условий рационального энергопреобразования в двига-

теле мы опирались на следующие принципы повышения удельных силовых и энергетических показателей импульсных ЛЭМД [30]: полнота электромеханического использования магнитной энергии рабочих зазоров, многозазорность и укорочение магнитной системы, концентрация магнитной энергии в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД как на этапе трогания якоря (способ статического накопления магнитной энергии) [78; 100; 106; 117], так и при движении якоря (способ динамического накопления)[18; 50; 121].

Исследование условий энергопреобразования и режимов работы ЭМП, выполненное в предыдущих разделах и в [13; 93; 99; 118; 124], позволило выявить пять элементарных магнитных циклов с различными соотношениями магнитных и механических энергий:  $I_H > I_K, \Psi_H > \Psi_K$ ;  $I_H > I_K, \Psi_H = \Psi_K (\Psi = \text{const})$ ;  $I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K$ ;  $I_H = I_K (I = \text{const}), \Psi_H < \Psi_K$ ;  $I_H < I_K, \Psi_H < \Psi_K$ .

В отличие от магнитного цикла энергетический режим дополнительно учитывает степень восстановления магнитной энергии при движении якоря. Поэтому цикл с убывающим током и возрастающим потокоцеплением ( $I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K$ ) в секторе II (Рисунок 4.1) в свою очередь включает в себя не один, а три энергетических режима: режим 3 ( $I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K, -1 < k_B < 0$ ), режим 4 ( $I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K, k_B = 0$ , то есть  $W_M = \text{const}$ ), режим 5 ( $I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K, 0 < k_B < 1$ ). Таким образом, в пять элементарных магнитных циклов входят семь энергетических режимов [124]. Особенности двигательных энергетических режимов 1...7 определены через коэффициент восстановления магнитной энергии  $k_B$ , а также через начальные и конечные значения токов  $I_H, I_K$ , потокоцеплений  $\Psi_H, \Psi_K$ , кратности  $k, m$  и представлены в таблице 4.2.

Предполагается, что рассматриваемые энергетические режимы реализованы с помощью УПУ, а не только источниками ЭДС или тока.

Исследуем влияние коэффициента восстановления  $k_B$  из (4.4), кратностей изменения индуктивности  $m$  и тока  $k$  на энергетические характеристики этих режимов [99; 118; 124-126]:  $m = L_K / L_H$ ,  $k = I_H / I_K$ , где  $L_H, L_K$  – начальное и конечное значения статической индуктивности ЛЭМД.

Таблица 4.2 – Характеристики энергетических режимов импульсных ЛЭМД при ненасыщенной магнитной цепи

Энергетический режим	Особенности режима	Механическая работа, $A$	Остаточная магнитная энергия, $W_{MO}$	Магнитный КПД, $\eta_m$
1	$I_H > I_K, \Psi_H > \Psi_K;$ $k_{(1)} > m > 1; k_B < -1$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(1)}^2 \cdot L_H \cdot (m-1)}{k_{(1)}}$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(1)}^2 \cdot L_H \cdot m}{k_{(1)}^2}$	$\frac{1}{1 + \frac{1}{k_{(1)} \cdot (1-1/m)}}$
2	$I_H > I_K,$ $\Psi_H = \Psi_K = \Psi;$ $m = k_{(2)} > 1; k_B = -1$	$0,5 \cdot I_{H(2)}^2 \cdot L_H \cdot (m-1)$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(2)}^2 \cdot L_H \cdot m}{k_{(2)}^2}$	$1 - \frac{1}{m}$
3	$I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K;$ $m > k_{(3)} > \sqrt{m} > 1;$ $-1 < k_B < 0$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(3)}^2 \cdot L_H \cdot (m-1)}{k_{(3)}}$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(3)}^2 \cdot L_H \cdot m}{k_{(3)}^2}$	$\frac{1}{1 + \frac{1}{k_{(3)} \cdot (1-1/m)}}$
4	$I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K;$ $k_{(4)} = \sqrt{m} > 1; k_B = 0$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(4)}^2 \cdot L_H \cdot (m-1)}{k_{(4)}}$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(4)}^2 \cdot L_H \cdot m}{k_{(4)}^2}$	$\frac{\ln m}{1 + \ln m}$
5	$I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K;$ $\sqrt{m} > k_{(5)} > 1;$ $0 < k_B < 1$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(5)}^2 \cdot L_H \cdot (m-1)}{k_{(5)}}$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(5)}^2 \cdot L_H \cdot m}{k_{(5)}^2}$	$\frac{1}{1 + \frac{1}{k_{(5)} \cdot (1-1/m)}}$
6	$I_H = I_K = I,$ $\Psi_H < \Psi_K;$ $m > k_{(6)} = 1; k_B = +1$	$0,5 \cdot I_{H(6)}^2 \cdot L_H \cdot (m-1)$	$0,5 \cdot I_{H(6)}^2 \cdot L_H \cdot m$	$\frac{1}{1 + \frac{1}{1-1/m}}$
7	$I_H < I_K, \Psi_H < \Psi_K;$ $m > 1 > k_{(7)} > 0; k_B > 1$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(7)}^2 \cdot L_H \cdot (m-1)}{k_{(7)}}$	$\frac{0,5 \cdot I_{H(7)}^2 \cdot L_H \cdot m}{k_{(7)}^2}$	$\frac{1}{1 + \frac{1}{k_{(7)} \cdot (1-1/m)}}$

В качестве критериев для сравнения энергетических режимов 1...7 примем:

- механическую работу  $A$ , совершаемую при движении якоря за рабочий цикл и состоящую из начальной магнитной энергии  $W_{MH}=0,5L_H \cdot (I_H)^2$  без остаточной магнитной энергии  $W_{MO}$  и магнитной энергии, накапливаемой (со знаком «плюс») или рекуперируемой (со знаком «минус») во время движения:

$$A = W_{MH} - W_{MO} \pm W_{M,ДВ}, \quad (4.6)$$

$$W_{MO} = \int_0^{\Psi_{ост}} i d\Psi, \quad W_{M,ДВ} = \int_{\Psi_H}^{\Psi_{ост}} i d\Psi; \quad (4.7)$$

- магнитный КПД  $\eta_m$ , представляющий собой отношение механической работы  $A$  к сумме этой работы и остаточной магнитной энергии  $W_{MO}$ :

$$\eta_M = \frac{A}{A + W_{MO}}; \quad (4.8)$$

- коэффициент эффективности цикла  $\eta_{ц}$ , представляющий отношение механической работы  $A$  к механической работе предельного магнитного цикла  $A_{п}$ , выраженной через максимальные значения  $I_M$  и  $\Psi_M$ :

$$\eta_{ц} = \frac{A}{A_{п}} = \frac{A}{I_M \cdot \Psi_M}; \quad (4.9)$$

- коэффициент остаточной магнитной энергии  $k_0$ , представляющий отношение остаточной магнитной энергии к магнитной энергии цикла:

$$k_0 = \frac{W_{MO}}{A + W_{MO}}. \quad (4.10)$$

На рисунке 4.4 показаны режимы (1...7) в виде линий и областей, обозначенных в кружочках, при условии  $W_{MO} = \text{const}$ .

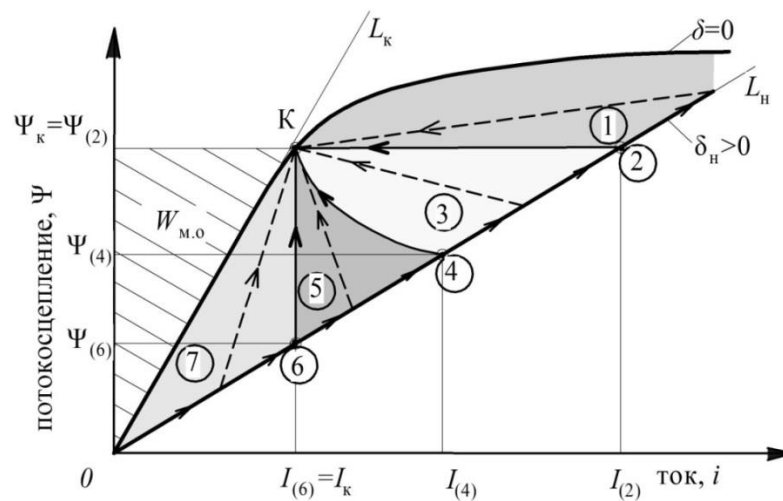


Рисунок 4.4 – Энергетические режимы (1...7) работы импульсного ЛЭМД при одинаковой остаточной магнитной энергии  $W_{MO}$  в магнитной системе

Охарактеризуем кратко выбранные критерии. Так как рассматриваемые преобразователи представляют собой силовые электромагнитные импульсные системы, то величина механической работы является одним из основных показателей их работоспособности. Магнитный КПД дает общую оценку эффективности преобразования магнитной энергии в механическую работу. Коэффициент эффективности магнитного цикла характеризует полноту электромеханического использования магнитной энергии и позволяет сравнить степень преобразования

магнитной энергии в механическую работу данного цикла с предельным, у которого механическая работа максимальна и равна  $A_{\Pi}$  из (4.9).

Коэффициент остаточной магнитной энергии характеризует относительный уровень магнитной энергии, оставшейся в магнитной системе в конце процесса движения якоря. Остаточная магнитная энергия в виде обратного потока может выступить как реактивная составляющая энергии и, если не принять меры по ее гашению и (или) полезному использованию, существенно снизить такие технико-экономические показатели ЛЭМД, как КПД, коэффициент мощности.

Анализ полученных выражений  $A$  и  $\eta_m$  показывает, что значения этих показателей определяются коэффициентом  $k_b$  и кратностями  $m$  и  $k$ . Значение  $W_{\text{мо}}$  определяется только конечными значениями индуктивностей и токов. Выражения механической работы, остаточной магнитной энергии, магнитного КПД для энергетических режимов 1...7 (Рисунок 4.4) одинаковы и могут в обобщенной форме выступать в качестве соответствующих критериев этих режимов. От обобщенной формы легко перейти к выражению для конкретного энергетического режима, учитывая его особенности.

Как известно, для режима 1 характерно совершение механической работы за счет запасенной магнитной энергии на этапе трогания якоря при одновременном возвращении части ее в управляемый источник. При использовании выведенных расчетных выражений для критериев этого режима необходимо соблюдать условие  $k_{(1)} > m$  при коэффициенте восстановления  $k_b < -1$ .

Сравним энергетические режимы 1...7, изображенные на рисунке 4.4, по предложенным критериям. Для этого из таблицы 4.2 выразим в обобщенном виде механическую работу для любого из режимов 1...7 [99; 118; 125; 126]:

$$A = 0,5 \cdot I_{\text{н(реж)}}^2 \cdot L_{\text{н}} \cdot \frac{(m-1)}{k_{(\text{реж})}}, \quad (4.11)$$

в которой  $m$  является конструктивным параметром, определяемым при заданной конструкции магнитной системы начальным воздушным зазором ЛЭМД,  $I_{\text{н(реж)}}$ ,  $k_{(\text{реж})}$  — начальный ток (ток трогания) и режимный параметр ( $k_{(\text{реж})} = I_{\text{н(реж)}}/I_{\text{к}}$ ), соответствующие выбранному энергетическому режиму двигателя с присущим



ему коэффициентом восстановления  $k_{\text{в}}$ .

Тогда (4.11) для, например, режима 6 ( $I = \text{const}$ ) примет вид:

$$A_{(6)} = 0,5 \cdot I_{\text{н}(6)}^2 \cdot L_{\text{н}} \cdot \frac{(m-1)}{k_{(6)}}, \quad (4.12)$$

где  $k_{(6)} = 1$ .

Аналогичные выражения механической работы для режимов 4 ( $W_{\text{м}} = \text{const}$ ) и 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) будут:

$$A_{(4)} = 0,5 \cdot I_{\text{н}(4)}^2 \cdot L_{\text{н}} \cdot \frac{(m-1)}{k_{(4)}} = 0,5 \cdot L_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}(6)}^2 \cdot \sqrt{m} \cdot (m-1); \quad (4.13)$$

$$A_{(2)} = 0,5 \cdot I_{\text{н}(2)}^2 \cdot L_{\text{н}} \cdot \frac{(m-1)}{k_{(2)}} = 0,5 \cdot L_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}(6)}^2 \cdot m \cdot (m-1), \quad (4.14)$$

в которых, как будет показано в п.4.5,  $k_{(4)} = \sqrt{m}$ ;  $k_{(2)} = m$ .

Приняв за базу сравнения остаточную магнитную энергию  $W_{\text{мо}} = 0,5 \cdot L_{\text{к}} \cdot I_{(6)}^2 \cdot m$ , одинаковую для всех режимов (на рисунке 4.4 заштрихована), получим выражения в относительной форме  $A_* = A/W_{\text{мо}}$ , используемые при их сравнении:

$$A_{(6)*} = \frac{1}{m} \cdot (m-1); \quad (4.15)$$

$$A_{(4)*} = \frac{1}{\sqrt{m}} \cdot (m-1); \quad (4.16)$$

$$A_{(2)*} = m-1. \quad (4.17)$$

На рисунке 4.5 представлены зависимости (4.15)-(4.17), из которых следует, что при таких условиях сравнения режимов механическая работа  $A_{(6)}$  уступает работе  $A_{(4)}$  и, тем более,  $A_{(2)}$ . Кроме того, механическая работа импульсного ЛЭМД возрастает с увеличением кратности изменения индуктивности, причем наибольшая интенсивность роста наблюдается для энергетических режимов 2...4, меньшая – для 5...6. Следовательно, для повышения механической работы и энергии удара ЛЭМД рекомендуется использовать наибольшую кратность  $m$ , реализуя ее, например, за счет повышенного рабочего хода и конструкции магнитной системы с двумя и более рабочими зазорами.

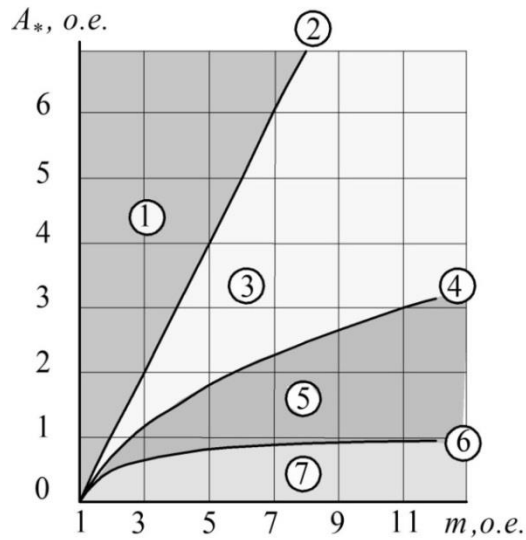


Рисунок 4.5 – Механическая работа импульсного ЛЭМД, работающего по энергетическим режимам 1...7, при одинаковой остаточной магнитной энергии  $W_{\text{мо}}$  в магнитной системе

Выполним сравнение энергетических режимов по критерию «механическая работа» с использованием обобщенного выражения (4.11) при другом условии – одинаковой начальной магнитной энергии  $W_{\text{мн}}$  (на рисунке 4.6 заштрихована), запасенной в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД на этапе трогания с одним и тем же током трогания  $I_{\text{н.реж}} = I_{\text{н}(6)}$ :  $W_{\text{мн}} = 0,5 \cdot L_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}^2 = 0,5 \cdot L_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}(6)}^2 = \text{const.}$

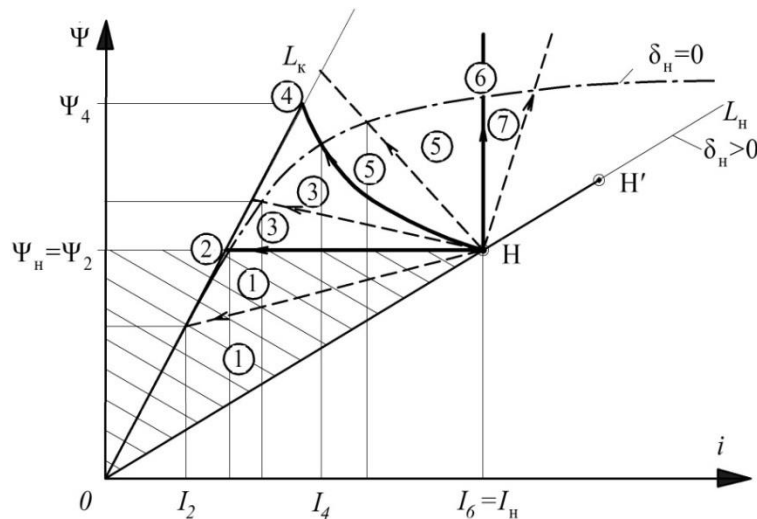


Рисунок 4.6 – Энергетические режимы (1...7) работы импульсного ЛЭМД при одинаковой начальной магнитной энергии  $W_{\text{мн}}$  в магнитной системе

Тогда получим следующие выражения механической работы  $A_{(6)}$ ,  $A_{(4)}$  и  $A_{(2)}$  в относительной форме:

$$A_{(6)*} = m - 1; \quad (4.18)$$

$$A_{(4)*} = \frac{1}{\sqrt{m}} \cdot (m - 1); \quad (4.19)$$

$$A_{(2)*} = \frac{1}{m} \cdot (m - 1). \quad (4.20)$$

Сравнивая эти выражения с аналогичными (4.15)-(4.17) при первом условии, видим, что выражения для режимов 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) и 6 ( $I = \text{const}$ ) поменялись местами (Рисунок 4.7). Из рисунка 4.7 следует, что по критерию «механическая работа» режимы 5...7 превосходят остальные режимы. Однако реализовать это превосходство на практике невозможно, поскольку движение рабочей точки Н (Рисунок 4.6) на плоскости « $\Psi - i$ » ограничено кривой намагничивания (штрихпунктирная линия).

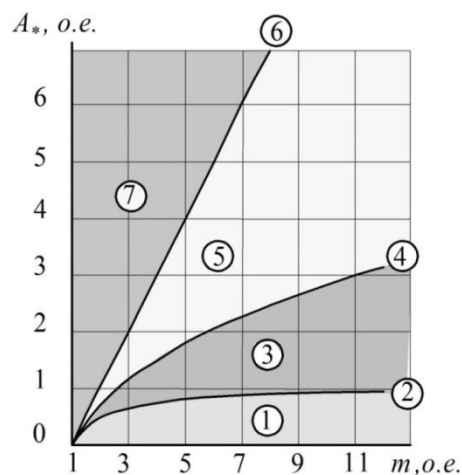


Рисунок 4.7 – Механическая работа импульсного ЛЭМД, работающего по энергетическим режимам 1...7, при одинаковой начальной магнитной энергии  $W_{\text{мн}}$  в магнитной системе

При рассмотренных выше двух условиях сравнения конфигураций магнитных циклов для энергетических режимов 1...7 по критерию «механическая работа» можно сделать выводы о том, организация режимов работы импульсного ЛЭМД по первому условию ( $W_{\text{м0}} = \text{const}$ ) (Рисунок 4.4) по сравнению со вторым ( $W_{\text{мн}} = \text{const}$ ) (Рисунок 4.6) имеет следующие преимущества:

- отсутствие сильного насыщения магнитной системы двигателя;
- лучшее использование магнитной системы, особенно для режимов 2...4

(Рисунок 4.4), для которых коэффициент восстановления  $k_v \leq 0$ .

Напротив, организация режимов работы импульсного ЛЭМД по второму условию ( $W_{\text{мн}} = \text{const}$ ) (Рисунок 4.6) вызовет худшее использование магнитной системы двигателя для всех режимов 1...7. К тому же из-за невысокой начальной магнитной индукции потребуются режимы с высоким значением  $k_v$ , при которых накопление магнитной энергии в рабочих зазорах будет происходить во время движения якоря. Попытка увеличить начальную магнитную энергию  $W_{\text{мн}}$  (точка Н', Рисунок 4.6) сделает невозможным движение рабочей точки по траекториям режимов 3...7 из-за естественных ограничений, что вызовет ухудшение практически всех энергетических критериев этих режимов.

Обобщающее сравнение рассматриваемых энергетических режимов 1...7 по магнитному КПД в зависимости от кратности изменения индуктивности показывает, что наибольшим магнитным КПД обладает энергетический режим 1 с рекуперацией энергии, показанный на рисунке 4.8 в виде области 1.

В этом режиме возможно получить бóльший магнитный КПД при меньших кратностях  $m$  по сравнению с другими. К аналогичным выводам пришел профессор В. Н. Бондалетов при исследовании магнитного КПД  $\eta_{\text{м}} = (L_{\text{к}}^3 - L_{\text{н}}^3) / (L_{\text{к}}^3 + 2 \cdot L_{\text{н}}^3)$  режима с рекуперацией при известном законе уменьшения тока  $i = I_{\text{н}} \cdot (L_{\text{н}} / L)^2$  [123].

На рисунке 4.8 режимы 1, 3, 5 и 7 представлены в виде областей изменения магнитного КПД, которые зависят как от конструктивного параметра  $m$ , так и от режимного  $k_{(\text{реж})}$ .

Напротив, режимы 2, 4 и 6 представлены в виде линий, поскольку для этих режимов известно соотношение между параметрами, либо их точное значение. Например, для режима 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) известно соотношение  $m = k_{(2)}$ , для режима 4 ( $W_{\text{м}} = \text{const}$ ) будет  $k_{(4)} = \sqrt{m}$ , а для режима 6 ( $I = \text{const}$ )  $m > k_{(6)} = 1$ .

Режим 3, например, с кратностью тока  $k_{(3)} = 5$  может быть реализован только при параметре  $m > 5$  и показан пунктирной линией (Рисунок 4.8). При таких условиях режим 3 уступает режиму 2 по магнитному КПД на 10-15%.

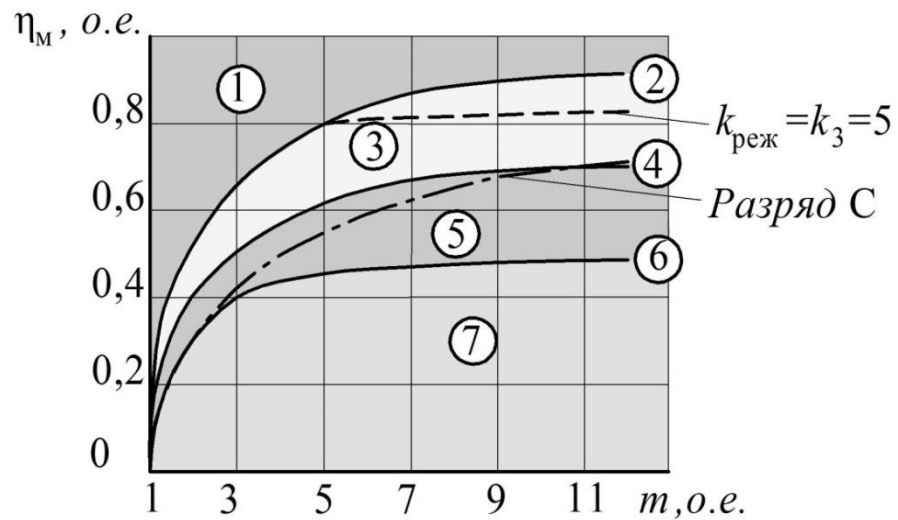


Рисунок 4.8 - Зависимости магнитного КПД  $\eta_m$  от кратности изменения индуктивности  $m$  импульсного ЛЭМД, работающего по энергетическим режимам 1...7

Рассмотренные режимы 1...3 обладают отрицательными коэффициентами восстановления. Это означает, что накопленная на этапе трогания магнитная энергия рабочих зазоров к концу хода якоря уменьшается, не успевая восстановиться за счет источника питания. Благодаря относительно невысокой остаточной магнитной энергии  $W_{mo}$  магнитный КПД этих режимов в соответствии с (4.8) превышает 60...70%, подтверждая их высокую эффективность энергопреобразования уже в диапазоне изменения кратности  $m = 3...7$ .

Режим 4 ( $W_m = \text{const}$ ) имеет коэффициент восстановления  $k_b = 0$  и соответственно меньший магнитный КПД в диапазоне указанных значений  $m$ .

Магнитный КПД режима, соответствующий разряду конденсатора на обмотку ЛЭМД [123] в случае колебательного процесса разряда, равен

$$\eta_m = 1 - \sqrt{\frac{1}{m}}.$$

Он меньше, чем для режимов 1...4, особенно при малых кратностях изменения индуктивности (штрихпунктирная линия на рисунке 4.8).

По магнитному КПД режим 6 ( $I = \text{const}$ ) с коэффициентом восстановления  $k_b = 1$  превосходит режим 7, уступая режимам 1...5, у которых  $k_b < 1$ .

Анализ зависимостей  $\eta_m(m)$  показывает, что при  $m > 3$  интенсивность роста магнитного КПД для режимов 1...7 замедляется.

Оценим влияние начальной  $L_H$  и конечной  $L_K$  индуктивностей на значения механической работы и магнитного КПД энергетических режимов, по которым работают импульсные ЛЭМД. Для этих режимов представим согласно (4.11) и таблице 4.2 обобщенные выражения относительной механической работы и магнитного КПД. Выразим четыре частных производные от  $A_*$  и  $\eta_m$  по индуктивностям  $L_H$  и  $L_K$  и сравним их [99].

$$\frac{\partial A_*}{\partial L_K} = \frac{1}{k \cdot L_H}; \quad \left| \frac{\partial A_*}{\partial L_H} \right| = \frac{L_K}{k \cdot L_H^2} = m \cdot \frac{\partial A_*}{\partial L_K};$$

$$\left| \frac{\partial \eta_m}{\partial L_K} \right| = \frac{\frac{L_H}{k}}{\left( L_K - L_H - \frac{L_K}{k} \right)^2}; \quad \frac{\partial \eta_m}{\partial L_H} = \frac{\frac{L_K}{k}}{\left( L_K - L_H - \frac{L_K}{k} \right)^2} = m \cdot \frac{\partial \eta_m}{\partial L_K}.$$

Так как величина кратности изменения индуктивности  $m$  всегда больше единицы, то

$$\frac{\partial A_*}{\partial L_H} > \frac{\partial A_*}{\partial L_K}, \quad \frac{\partial \eta_m}{\partial L_H} > \frac{\partial \eta_m}{\partial L_K}.$$

То есть изменение величины начальной индуктивности в большей степени влияет на величины механической работы и магнитного КПД импульсного ЛЭМД, чем конечной, причем это влияние пропорционально  $m$ . Следовательно, для повышения удельных энергетических показателей ЛЭМД и роста критериев  $A_*$  и  $\eta_m$  следует стремиться к росту числа рабочих воздушных зазоров и увеличивать при этом кратность изменения индуктивности  $m$  как за счет уменьшения потоков рассеяния и величины начальной индуктивности, так и за счет уменьшения остаточной магнитной энергии  $W_{mo}$ . Для конкретной конструкции магнитной системы ЛЭМД необходимо полнее использовать рабочий ход якоря как за счет уменьшения конечного рабочего зазора до значения, близкого к нулю, так и за счет увеличения начального рабочего зазора до величины, обусловленной длиной обмотки. Потоки рассеяния, как показано в [9], при номинальном рабочем зазоре ЛЭМД определяют запас магнитной энергии  $W_{mh}$  и зависят от типа магнитных систем двигателей и в некоторых из них могут быть полезно

использованы. Например, нами установлены специальные режимы работы ЛЭМД с магнитной системой интегрированной структуры, при которых происходит аккумулирование магнитной энергии в рабочих зазорах на начальном этапе движения якоря, связанное с некоторым уменьшением начальной индуктивности и возникающим вследствие этого генераторным эффектом. При этом наблюдается рост всех перечисленных выше энергетических критериев [114].

Рассмотрим условия рационального использования электромагнитной энергии рабочих зазоров в ЛЭМД. С учетом соотношений, полученных для механической работы в таблице 4.2, представим баланс энергии на второй ступени энергопреобразования в виде:

$$W_M = 0,5 \cdot I_H \cdot I_K \cdot (L_K - L_H) + \int_0^{\Psi_K} i d\Psi.$$

Интегрируя по частям второе слагаемое полученного выражения, представим его в виде:

$$W_M = 0,5 \cdot I_H \cdot I_K \cdot (L_K - L_H) + I_H \cdot \Psi_K + \int_{I_K}^0 \Psi di.$$

Для бесконечно малого интервала времени  $dt$  последнее уравнение примет вид, совпадающий с полученным в [13]:

$$W_M = 0,5 \cdot I_H \cdot I_K \cdot dL + \Delta\Psi di, \quad (4.21)$$

из чего следует, что для рационального использования магнитной энергии рабочих зазоров целесообразно исключить или хотя бы снизить её обратный поток. Последний обусловлен вторым слагаемым в (4.21) и возникает при  $di < 0$  в случае, когда электрическая связь обмотки двигателя с источником существует. Это соответствует работе ЛЭМД по режиму 1 (Рисунки 4.4 и 4.6). Свойственная режиму 1 рекуперация магнитной энергии в источник сопровождается потерями энергии и свидетельствует о невозможности полезного использования этой части энергии, так как возврат энергии в источник не является целью двигательного режима [114]. Для исключения этого явления используют, как показано в [116; 117; 127; 128], обратный диод.

На рисунке 4.9 представлены характеристики, показывающие влияние ко-

эффициента восстановления  $k_B$  на относительную механическую работу  $A_*$  импульсного ЛЭМД при одной и той же остаточной магнитной энергии  $W_{mo}$ .

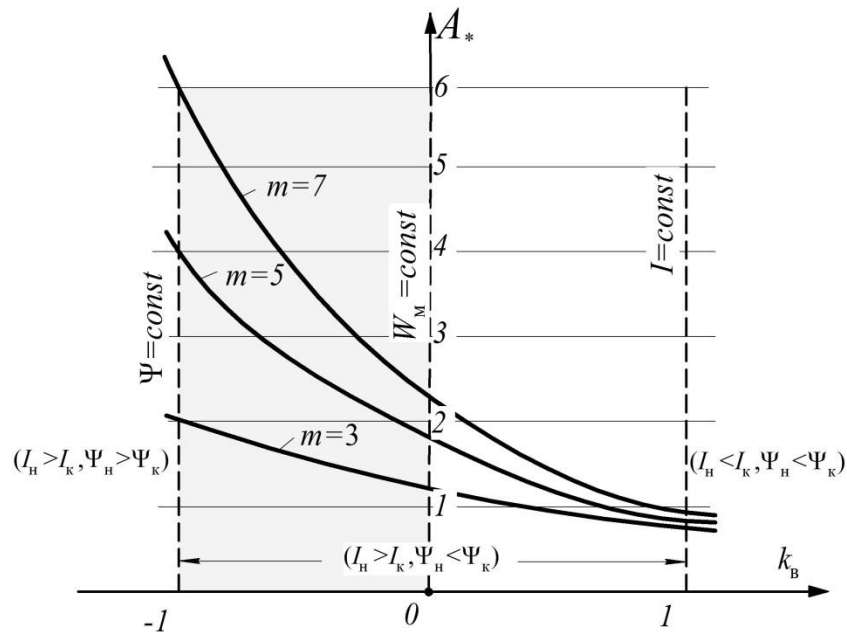


Рисунок 4.9 – Влияние коэффициента восстановления на механическую работу импульсного ЛЭМД при  $W_{mo}=const$

Эти характеристики соответствуют различным значениям кратности изменения индуктивности  $m$ , характерных для одно- ( $m=3$ ), двух- ( $m=5$ ) и трехзазорной ( $m=7$ ) магнитных систем. Из графиков следует, что лучшими энергетическими режимами, по которым функционируют импульсные ЛЭМД, будут режимы, при которых коэффициент  $k_B$  находится в диапазоне  $-1 \leq k_B \leq 0$ . Ими являются режимы при неизменном потокоцеплении, либо при незначительном росте последнего при движении якоря и снижении тока обмотки.

Эти режимы соответствуют энергопреобразованию, происходящему преимущественно за счет предварительно накопленной магнитной энергии и при минимуме потребляемой в процессе движения якоря электрической энергии от источника. Это позволяет радикально повысить удельную механическую работу импульсного ЛЭМД. Идея предварительного накопления магнитной энергии на этапе трогания была впервые высказана в патенте [101] и далее развита в последующих работах [9; 15; 18-20; 30; 50; 78; 81; 88; 93; 102; 106; 121; 122; 129]. Величина механической энергии, накапливаемой в рабочих зазорах, включенных в магнитную цепь двигателя последовательно, растет с увеличением числа зазо-



ров. По сравнению, например с режимом  $I=\text{const}$  (Рисунок 4.9) функционирование импульсного ЛЭМД по лучшему из режимов (режим  $\Psi=\text{const}$ ) позволяет практически в 6 раз повысить механическую работу двигателя применительно к трехзачерной магнитной схеме, в 4 раза – для двухзачерной и в 2 раза – для одностачерной.

Хотя механическую работу заданной величины возможно получить при любом из энергетических режимов 1...7 вне зависимости от способа их организации, магнитный КПД, характеризующий эффективность электромеханического преобразования энергии, будет выше для режимов 1...4. Однако с режимом 1 связаны дополнительные потери энергии в цикле на ее рекуперацию в источник и сложности в его реализации. Следовательно, режим 1 не будет энергоэффективным. Поэтому в алгоритмах энергопреобразования по критериям механической работы и магнитного КПД рекомендуются энергетические режимы 2...4.

Таким образом, предложены критерии эффективности процессов электромеханического преобразования энергии в импульсных ЛЭМД и определены значения этих критериев. По критериям механической работы и магнитного КПД наилучшими являются энергетические режимы с падающим по ходу движения током, то есть от режима 2 ( $\Psi=\text{const}$ ) до режима 4 ( $W_m=\text{const}$ ).

Способ реализации режимов электромеханического преобразования при постоянстве конечной магнитной энергии в магнитной системе двигателя по сравнению со способом при постоянстве начальной магнитной энергии предпочтительнее.

### **4.3 Критерии эффективности преобразования магнитной энергии в ЛЭМД**

Технико-экономические показатели ЛЭМД, применяемых для реализации импульсных технологий, во многом определены режимами их работы. Наибольший интерес при этом представляет влияние на энергопреобразование степени восстановления магнитной энергии за счет электрической при движении якоря двигателя [5; 16].

В отличие от (3.1) уравнение энергетического баланса импульсного ЛЭМД можно представить как:

$$\pm dW_c \pm dA_{\text{вн}} = \pm dW_{\text{м.дв}} \pm dA + dQ, \quad (4.22)$$

где  $dW_c$  – изменение (приращение) электрической энергии источника питания;  $dA_{\text{вн}}$  – изменение сторонней механической энергии в виде работы внешних сил, которые могут быть приложены к электромеханической системе;  $dW_{\text{м.дв}}$  – изменение энергии магнитного поля при движении якоря;  $dA$  – изменение механической работы;  $dQ$  – потери.

Физический смысл положительных значений приращений энергий  $dW_c$ ,  $dA_{\text{вн}}$ ,  $dW_{\text{м.дв}}$  и  $dA$  означает соответственно:

- 1) поступление электрической энергии источника и преобразование ее в магнитную энергию рабочих зазоров импульсного ЛЭМД;
- 2) ввод сторонней механической энергии в электромеханическую систему в виде работы внешних сил, направленных на уменьшение рабочего зазора при совпадении этих сил с электромагнитным усилием;
- 3) увеличение магнитной энергии рабочих зазоров импульсного ЛЭМД;
- 4) совершение механической работы импульсного ЛЭМД за счет электромагнитного усилия, уменьшающего рабочий зазор, при совпадении этого усилия с внешними.

В главе 5 исследуется влияние сторонней механической энергии, вводимой в электромеханическую систему в виде внешней механической силы, приложенной к якорю импульсного ЛЭМД согласно с его электромагнитным тяговым усилием. Установлено, что при определенных соотношениях этих усилий возможен так называемый «генераторный эффект», снижающий полезную энергию рабочего хода двигателя [130].

Отрицательные значения приращений  $dW_c$ ,  $dA_{\text{вн}}$ ,  $dW_{\text{м.дв}}$  и  $dA$  свидетельствуют:

- 1) о поступлении электромагнитной энергии из импульсного ЛЭМД в источник электрической энергии;
- 2) о вводе сторонней механической энергии в электромеханическую си-

стему в виде работы внешних сил, направленных на увеличение рабочих зазоров импульсного ЛЭМД и при несовпадении направления этих сил с электромагнитным усилием, когда первые преобладают над последним;

3) об уменьшении магнитной энергии рабочих зазоров импульсного ЛЭМД;

4) о совершении за счет сторонней механической энергии электро-механического преобразования, при котором механическая работа внешних сил преобразуется в магнитную энергию рабочих зазоров импульсного ЛЭМД при увеличивающемся рабочем зазоре и несовпадении направлений электромагнитного усилия с внешними силами и пре-вышении последних над электромагнитным усилием.

Выражение (4.22) позволяет рассмотреть все семь режимов энерго-преобразования в импульсных ЛЭМД, установленных в п. 4.1.

Различие процессов энергопреобразования в ЛЭМД в зависимости от степени восстановления магнитной энергии при движении якоря за счет электрической отмечено в предыдущих разделах и в [5; 16]. С целью углубления этих исследований рассмотрим влияние степени восстановления магнитной энергии в указанных процессах в электромеханических преобразователях электромагнитного типа при следующих допущениях: магнитная цепь двигателя не насыщена при ненулевом рабочем зазоре и насыщена при нулевом, потери в магнитопроводе и обмотке отсутствуют.

За критерий эффективности преобразования магнитной энергии в механическую в процессе движения якоря импульсного ЛЭМД примем [111]:

$$k_{\text{эф}} = \frac{dA}{dW_c} = \frac{dA}{dA + dW_{\text{м.дв}}}, \quad (4.23)$$

где  $dW_c = dA + dW_{\text{м.дв}}$  – энергия, поступившая в двигатель от источника за время движения его якоря.

Представим выражение (4.23) в виде:

$$k_{\text{эф}} = \frac{1}{1 + k_{\text{в}}}, \quad (4.24)$$

где  $k_b$  – коэффициент восстановления магнитной энергии из (4.4).

Из (4.24) видно, что величина и знак  $k_{эф}$  зависят от величины и знака  $k_b$ , причём знак  $k_b$  определяется знаком приращения магнитной энергии при движении якоря  $dW_{м.дв}$ , поскольку для двигательного режима всегда приращение механической работы  $dA > 0$ .

Определим значения  $k_b$  и  $k_{эф}$  для энергетических режимов [111], при которых магнитная энергия может восстанавливаться за счет электрической энергии. В таблице 4.3 приведены показатели эффективности режимов энергопреобразования для различных энергетических режимов двигателя.

Для цикла  $I = \text{const}$  (режим 6) совершение электромеханической системой положительной механической работы сопровождается увеличением магнитной энергии на величину, равную совершенной механической работе.

Таблица 4.3 – Критерии эффективности энергетических режимов ЛЭМД

Энергетический режим и его характеристика	$dA$	$dW_{м.дв}$	$dW_c$	$k_b$	$k_{эф}$	Сектор (Рисунок 4.12)
режим 1: $I_H > I_K, \Psi_H > \Psi_K,  dW_{м.дв}  >  dA $	$>0$	$<0$	$<0$	$<-1$	$<0$	I
режим 2: $\Psi = \text{const},  dW_{м.дв}  =  dA $	$>0$	$<0$	0	-1	$\infty$	граница I-II
режим 3: $I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K,  dW_{м.дв}  <  dA $	$>0$	$<0$	$>0$	$-1 < k_b < 0$	$1 < k_{эф} < \infty$	II
режим 4: $W_m = \text{const}$ $I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K,  dW_{м.дв}  <  dA $	$>0$	0	$>0$	0	1	граница II-III
режим 5: $I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K,  dW_{м.дв}  <  dA $	$>0$	$>0$	$>0$	$0 < k_b < 1$	$0,5 < k_{эф} < 1$	III
режим 6: $I = \text{const},  dW_{м.дв}  =  dA $	$>0$	$>0$	$>0$	1	0,5	граница III- IV
режим 7: $I_H > I_K, \Psi_H < \Psi_K,  dW_{м.дв}  >  dA $	$>0$	$>0$	$>0$	$>1$	$0 < k_{эф} < 0,5$	IV

При этом источник, питающий электромеханический преобразователь, дает энергию не только для совершения механической работы, но и на одно-

временное увеличение магнитной энергии системы, то есть затрачивает энергии вдвое больше, чем превращается системой в механическую работу:  $dW_c = dA + dW_{м.дв} = 2 dA$ . Следовательно,  $k_b = 1$ , а коэффициент  $k_{эф} = 0,5$ .

При постоянной магнитной энергии  $W_m = \text{const}$  (режим 4) ее приращение  $dW_{м.дв} = 0$ , то есть электромеханический преобразователь превращает в механическую работу в каждый момент времени столько энергии, сколько он получает из источника:  $dW_c > 0$ ,  $k_b = 0$ ,  $k_{эф} = 1$ .

Для энергетического режима 7, когда  $I_n < I_k$ ,  $\Psi_n < \Psi_k$ , коэффициент восстановления  $k_b > 1$ , но так как  $dW_{м.дв} > dA$ , то  $0 < k_{эф} < 0,5$ .

Для энергетического режима 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) ЭМП совершает механическую работу только за счет собственного запаса магнитной энергии, при этом приращения энергий будут:  $dW_c = 0$ ,  $dW_{м.дв} < 0$ ,  $|dW_{м.дв}| = |dA|$ , тогда  $k_b = -1$ ,  $k_{эф} = \infty$ .

Для магнитного цикла, у которого  $I_n > I_k$ ,  $\Psi_k > \Psi_n$ ,  $dW_c > 0$ , можно выделить три энергетических режима: режим 5, когда  $dW_{м.дв} > 0$ , причем  $|dW_{м.дв}| < |dA|$ , режим 4, когда  $dW_{м.дв} = 0$  и режим 3, когда  $dW_{м.дв} < 0$  и  $|dW_{м.дв}| < |dA|$ .

В первом случае коэффициент восстановления магнитной энергии меняется в пределах  $0 < k_b < 1$ , а мгновенный коэффициент эффективности преобразования магнитной энергии в механическую работу изменяется в пределах  $0,5 < k_{эф} < 1$ , во втором –  $k_b = 0$ ,  $k_{эф} = 1$ . В третьем случае  $k_b$  и  $k_{эф}$  меняются в диапазонах  $-1 < k_b < 0$ ,  $1 < k_{эф} < \infty$ .

Для магнитного цикла с рекуперацией  $\Psi_k < \Psi_n$ ,  $I_n > I_k$ , (режим 1), приращения  $dW_c < 0$  и  $dW_{м.дв} < 0$ , причём  $|dW_{м.дв}| < |dA|$ . В этом случае запас магнитной энергии  $dW_{м.дв}$  уменьшается со скоростью, большей, чем скорость превращения этой энергии в механическую работу. Значит, в этом случае преобразователь, совершая механическую работу, отдает энергию в источник питания. Коэффициент восстановления  $k_b$  и коэффициент эффективности  $k_{эф}$  будут при этом отрицательными, а по абсолютной величине могут принимать любые значения. Это свидетельствует о том, что в этом случае наблюдается совмещение двигательного и генераторного режимов [130].

На рисунке. 4.10 построены зависимости  $k_{эф} = f(k_b)$  для рассматриваемых

процессов преобразования энергии.

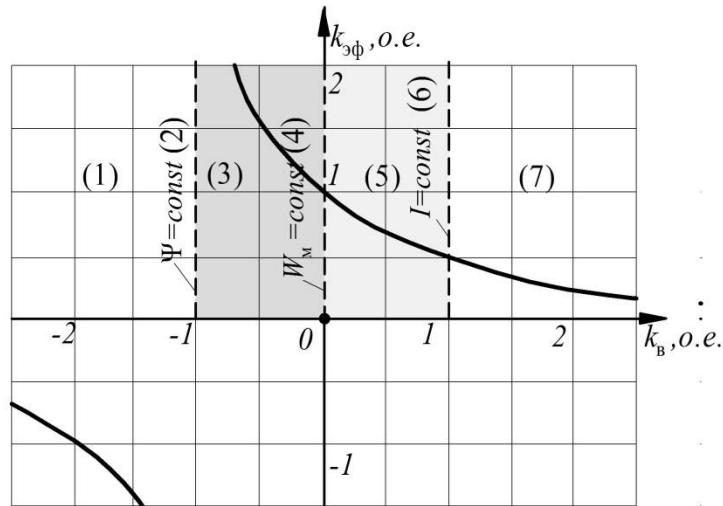


Рисунок 4.10 – Влияние коэффициента восстановления магнитной энергии на коэффициент эффективности для энергетических режимов (1)...(7) импульсного ЛЭМД

На рисунке 4.11 построены диаграммы возможных энергетических режимов работы импульсных ЛЭМД.

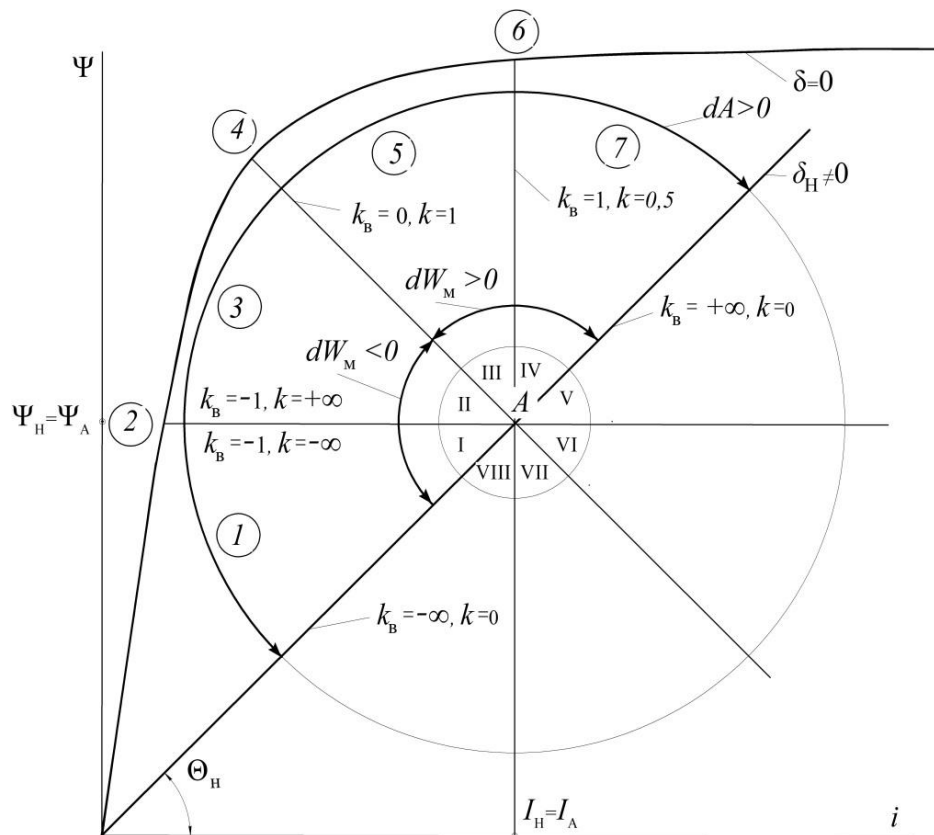


Рисунок 4.11 – Диаграммы энергетических режимов импульсных ЛЭМД

Установим соотношение между мгновенными значениями  $k_{\Phi}$  и магнит-

ного КПД  $\eta_m$  [118]:

$$\eta_m = \frac{A}{A + W_{mo}}, \quad (4.25)$$

где  $W_{mo}$  – остаточная магнитная энергия, запасенная в магнитной системе преобразователя после окончания движения якоря.

Разделив обе части выражения (4.25) на  $A$ , получим:

$$\eta_m = \frac{1}{1 + k_b \cdot \frac{W_{mo}}{A}}. \quad (4.26)$$

Выражение (4.26) показывает, что магнитный КПД также зависит от коэффициента восстановления магнитной энергии. При отрицательных значениях  $k_b$ , соответствующих режимам 2 и 3, значения магнитного КПД растут и стремятся к 1, что подтверждается результатами [99; 118]. Таким образом, величины как коэффициента эффективности  $k_{эф}$ , так и магнитного КПД  $\eta_m$  определяются значениями коэффициента восстановления  $k_b$  магнитной энергии.

Нами предложен критерий эффективности энергопреобразовательных процессов в импульсном ЛЭМД и определены его значения, по которым наилучшими будут энергетические режимы 2...4.

#### **4.4 Влияние обобщенных режимных и конструктивных параметров импульсных ЛЭМД на эффективность электромеханического преобразования**

В предыдущих разделах была обоснована необходимость концентрации магнитной энергии в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД перед началом рабочего хода. Также была произведена оценка уровня предельной механической работы ЭМП, который определяется обобщенным конструктивным параметром – углом  $\Theta_n$  (Рисунок 3.7) на характеристиках намагничивания. Тангенс этого угла представляет собой относительную начальную индуктивность (3.4).

В п. 3.2 установлено, что переход от одноззорной конструкции МС к

двухазорной (это соответствует изменению параметра  $\Theta_n$  от  $45^\circ$  до  $20...25^\circ$ ), позволит увеличить запас магнитной энергии, преобразуемой в механическую работу, в три и более раза [102].

В п. 4.1 были определены 16 энергетических режимов с помощью коэффициентов восстановления и ослабления, среди которых два режима соответствуют электромагнитному преобразованию энергии, а 14 – электромеханическому [124].

Очевидно, что переход от одного режима электромеханического преобразования к другому может происходить либо плавно и последовательно, либо дискретно.

Получим для энергетических режимов 1...7 выражение критерия эффективности электромеханического преобразования энергии  $k_{эф} = dA/dW_c$  [111], исследованного в предыдущем параграфе, в виде непрерывной функции обобщенного режимного параметра при заданном обобщенном конструктивном параметре. В качестве режимного параметра примем угол  $\beta$  (Рисунок 4.12).

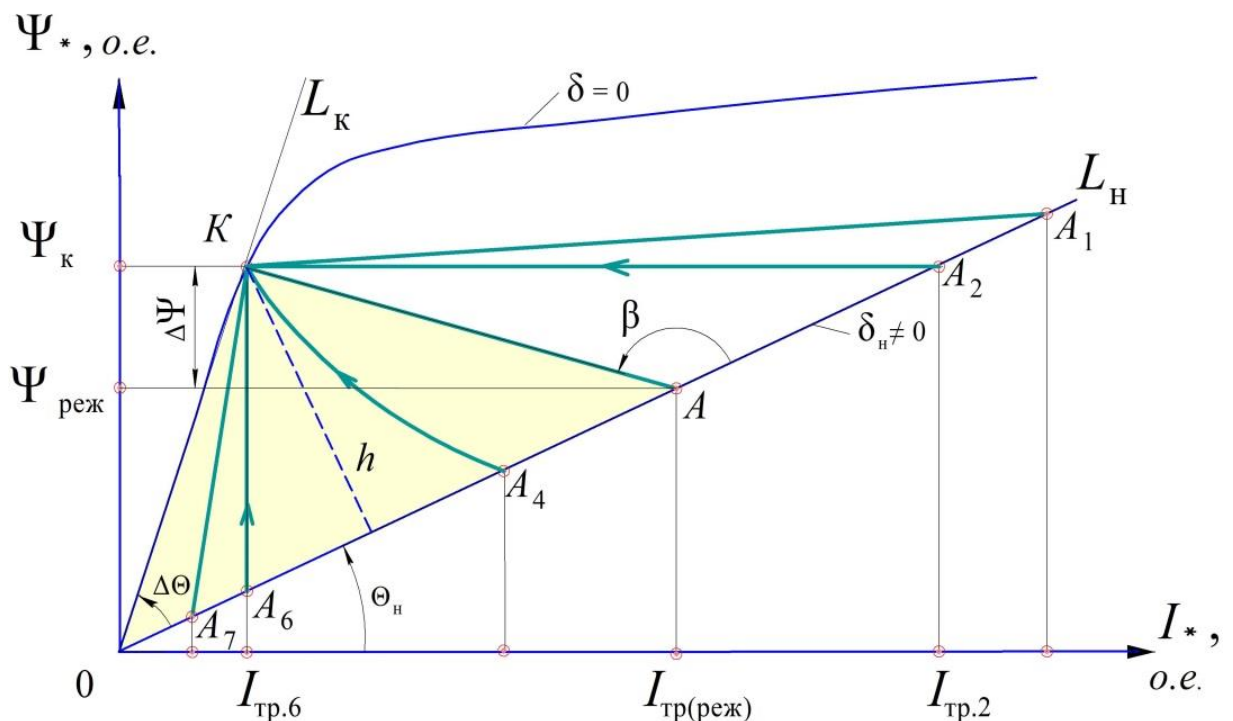


Рисунок 4.12 – Поведение импульсного на энергетической плоскости при неизменной остаточной магнитной энергии  $W_{mo}$



Исследование выполним при тех же допущениях [13; 16] и при условии неизменности остаточной магнитной энергии  $W_{м.о}$  в МС импульсного ЛЭМД. Такое условие выбрано потому, что в п. 4.2 показана его предпочтительность перед способом реализации режимов при постоянстве начальной магнитной энергии  $W_{мн}$ .

Тогда потребляемая от источника электрическая энергия  $dW_c \approx \Delta W_c$  и механическая работа  $dA \approx \Delta A$  могут быть представлены в виде функций двух переменных  $\beta$  и  $\Theta_n$ , из которых  $\beta$  будет непосредственно характеризовать режим электромеханического преобразования:

$$\Delta W_c = I_{тр(реж)} \cdot \Delta \Psi = I_{тр(реж)} \cdot (L_k \cdot I_{тр(б)} - L_n \cdot I_{тр(реж)}); \quad (4.27)$$

$$\Delta A = \frac{(OA) \cdot h}{2} = \frac{I_{тр(реж)} \cdot [L_k \cdot I_{тр(б)} - L_n \cdot I_{тр(реж)}] \cdot \sin(\pi - \beta)}{2 \cos \Theta_n \cdot \sin(\pi - \beta - \Theta_n)}, \quad (4.28)$$

где  $h = (AK) \cdot \sin(\pi - \beta)$  – высота треугольника ОАК, площадь которого пропорциональна механической работе  $\Delta A$  импульсного ЛЭМД (показано заливкой) за цикл на энергетической плоскости (Рисунок 4.12);

$$\text{отрезок } (AK) = \frac{\Delta \Psi}{\sin(\pi - \beta - \Theta_n)} = \frac{(L_k \cdot I_{тр(б)} - L_n \cdot I_{тр(реж)})}{\sin(\pi - \beta - \Theta_n)}.$$

Из (4.28) следует, что механическая работа импульсного ЛЭМД при принятом условии сравнения зависит от угла  $\beta$ , то есть от траектории движения рабочей точки А на энергетической плоскости, следовательно, от энергетического режима (магнитного цикла), по которому функционирует ЭМП.

Подставив (4.27) и (4.28) в выражение коэффициента эффективности, после преобразований получим:

$$k_{эф} = \frac{\sin \beta}{2 \cos \Theta_n \cdot \sin(\beta + \Theta_n)}. \quad (4.29)$$

В работе [131] так же было получено выражение для  $k_{эф}$ , однако при других условиях сравнения режимов, а именно, при  $W_{мн} = \text{const}$ , что, на наш взгляд, затрудняет реализацию режимов с возрастающим потокоцеплением из-за естественного ограничения (насыщения магнитной системы импульсного ЛЭМД) и потому менее предпочтительно. Кроме того, в этой работе коэффициент эффек-

тивности был найден для значения конструктивного параметра  $\Theta_n = 70^\circ$ , что неприемлемо ни для одноззорных конструкций МС, ни тем более для двухззорных из-за крайне низкого уровня запасаемой в рабочих зазорах магнитной энергии, что было показано нами в [102].

На рисунке 4.13 представлены зависимости коэффициента эффективности от режимного параметра  $\beta$  для  $\Theta_n = 45^\circ$  (двухззорные конструкции МС) и  $\Theta_n = 20^\circ$  (трехззорные конструкции МС), построенные по (4.29). Заливкой показана область работы импульсного ЛЭМД в энергетическом режиме 3 ( $I_n > I_k$ ,  $\Psi_n < \Psi_k$ ,  $-1 < k_b < 0$ ), который является одним из наиболее энергоэффективных.

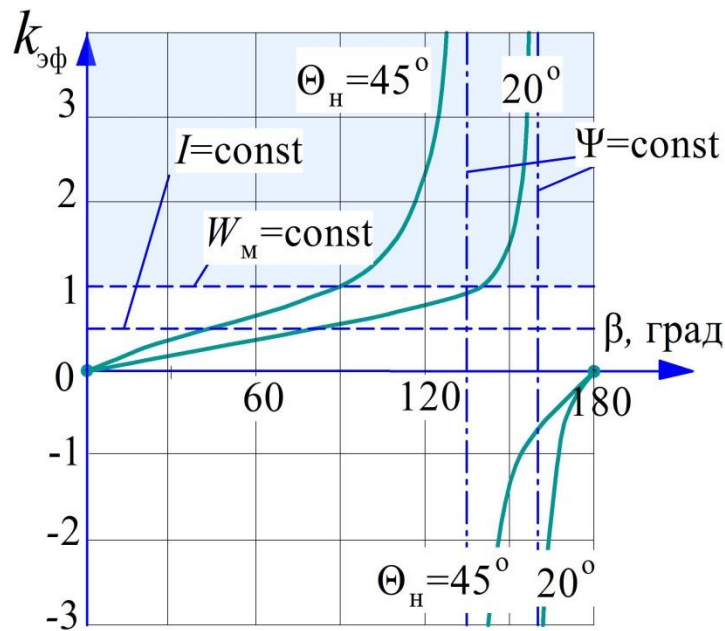


Рисунок 4.13 – Зависимости коэффициента эффективности от обобщенного режимного параметра  $\beta$  для значений  $\Theta_n = 20^\circ$  и  $\Theta_n = 45^\circ$

Поскольку эффективность энергопреобразования зависит от угла  $\beta$ , то целесообразно определить области наибольшей эффективности, приняв заданным нижний предел коэффициента эффективности  $k_{эф.3}$ :

$$|k_{эф}| \geq |k_{эф.3}|. \quad (4.30)$$

Для этого по выражению (4.29) найдены секторы, определяемые границами в виде значений параметров  $\beta_{мин}$  и  $\beta_{макс}$ , в которых для импульсного ЛЭМД, работающего в двигательном и совмещенном с двигательным режимах, выполняется условие (4.30). Если принять нижнее значение коэффициента эффектив-

ности по модулю, равным, например, единице, как и в работе [131], то есть для двигательного режима значение  $k_{\text{эф.з}}=1$ , а для совмещенного с двигательным – значение  $k_{\text{эф.з}} = -1$ , то выражение (4.30) с учетом (4.29) примет вид:

$$\left| \frac{\sin \beta}{2 \cos \Theta_{\text{н}} \cdot \sin(\beta + \Theta_{\text{н}})} \right| \geq 1. \quad (4.31)$$

После соответствующих преобразований выражения (4.31) получим границы сектора в виде неравенства:

$$\beta_{\text{мин}} < \beta < \beta_{\text{макс}},$$

в котором значения границ будут:

$$\beta_{\text{мин}} = \pi + \arctg \left( \frac{\sin 2\Theta_{\text{н}}}{1 - 2\cos^2 \Theta_{\text{н}}} \right); \quad (4.32)$$

$$\beta_{\text{макс}} = \pi + \arctg \left( -\frac{\sin 2\Theta_{\text{н}}}{1 + 2\cos^2 \Theta_{\text{н}}} \right). \quad (4.33)$$

На рисунке 4.14 представлены секторы, в которых энергопреобразование наиболее эффективно при конструкциях магнитной системы и положениях якоря, соответствующих параметрам  $\Theta_{\text{н}} = \pi/9$  ( $20^\circ$ ) и  $\Theta_{\text{н}} = \pi/4$  ( $45^\circ$ ).

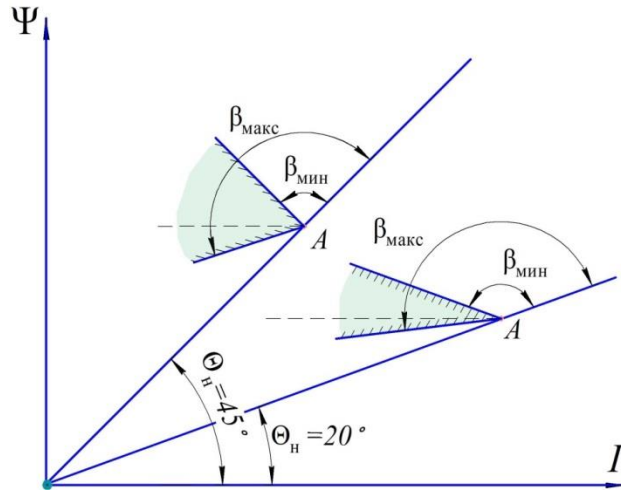


Рисунок 4.14 – Секторы эффективного энергопреобразования для  $|k_{\text{эф}}| \geq 1$  при значениях  $\Theta_{\text{н}} = 20^\circ$  и  $\Theta_{\text{н}} = 45^\circ$

Для конструктивного параметра  $\Theta_{\text{н}} = \pi/9$  наиболее эффективно энергопреобразование при постоянном потокоцеплении (Рисунок 4.14), что характер-

но и для классических электрических машин. Тогда как для значений  $\Theta = \pi/4$  и  $\Theta = 7\pi/18$  секторы эффективного энергопреобразования допускают большую вариацию режимного параметра  $\beta$ . Однако этот параметр не должен опускаться ниже значения, соответствующего энергетическому режиму 4 (магнитный цикл  $W_m = \text{const}$ ,  $k_b = 0$ ) и уж тем более режимам 5 и 6 ( $I = \text{const}$ ,  $k_b = 1$ ).

В результате для энергетических режимов 1...7 получено обобщенное выражение коэффициента эффективности преобразования магнитной энергии в импульсном ЛЭМД. С помощью этого критерия эффективности выявлены диапазоны изменения обобщенных конструктивного и режимного параметров импульсных ЛЭМД, в которых механическая работа максимальна. Этим диапазонам соответствуют энергетические режимы с уменьшающимся по ходу движения якоря током обмотки возбуждения, среди которых самым лучшим является режим 2 с постоянным потокосцеплением (магнитный цикл  $\Psi = \text{const}$ ,  $k_b = -1$ ), ему уступает режим 3 ( $I_n > I_k$ ,  $\Psi_n < \Psi_k$ ,  $-1 < k_b < 0$ ). Функционирование импульсных ЛЭМД по этим режимам обеспечит повышенные энергетические характеристики, такие как механическая работа и магнитный КПД.

#### **4.5 Электромеханические характеристики энергетических режимов импульсных ЛЭМД продольного магнитного поля в функции перемещения**

Ранее были установлены энергетические режимы импульсного ЛЭМД, отличающиеся степенью восстановления магнитной энергии при движении якоря. Для выявления рациональных режимов функционирования такого двигателя, являющегося электромеханическим преобразователем электромагнитного типа, необходимо дальнейшее изучение условий и особенностей преобразования магнитной энергии рабочих зазоров в механическую энергию. Получим обобщенные выражения основных электромеханических характеристик импульсного ЛЭМД для всех его энергетических режимов и с помощью этих характеристик выявить свойства режимов. В качестве электромеханических характеристик рассмотрим зависимости тока возбуждения  $i(x)$ , тягового электромагнитного уси-

лия  $F_э(x)$ , скорости перемещения якоря  $V(x)$ , механической мощности  $P_{мех}(x)$  за рабочий ход  $x$  якоря, выраженных в виде функций перемещения для каждого из рассмотренных в предыдущем разделе энергетических режимов, при которых происходит электромеханическое преобразование энергии. Это режимы 1...7 для двигательного режима импульсного ЛЭМД. Указанные электромеханические характеристики при изменении перемещения будут наиболее полно представлять эти режимы и могут быть использованы при их сравнении [115].

Примем, что магнитопровод импульсного ЛЭМД при рабочем зазоре  $\delta \neq 0$  не насыщен, при зазоре  $\delta = 0$  – насыщен. Рассмотрим одну и ту же магнитную систему двигателя при ее насыщении с одинаковыми значениями начальной  $L_H$  и конечной  $L_K$  индуктивностей и массы якоря  $m_a$ , но с разными значениями тока трогания  $I_{тр}$  для любых энергетических режимов в составе двигательного режима. Потерями в обмотке и стали пренебрегаем.

Пусть зависимость индуктивности от перемещения  $L(x)$  определяется для импульсного ЛЭМД продольного магнитного поля определится:

$$L(x) = \frac{a}{x_K - x + \delta_0(m)}, \quad (4.34)$$

где  $a$  – размерная константа;  $x_K$ ,  $x$  – соответственно конечное (минимальное) и текущее значения перемещения якоря;  $\delta_0(m) = x_K/(m-1)$ . В отличие от [53; 115] слагаемое  $\delta_0(m)$  в знаменателе (4.34) при  $x = x_K$  и при  $x = 0$  будет определяться кратностью  $m = L_K / L_H$ :

$$L_K = a / \left( x_K \cdot \left( \frac{m}{m-1} - 1 \right) \right); \quad L_H = a / \left( x_K \cdot \frac{m}{m-1} \right).$$

Тогда (4.34) примет вид:

$$L(x) = a / \left( x_K \cdot \left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K} \right) \right). \quad (4.35)$$

Электромеханические характеристики импульсного ЛЭМД, найденные сначала для трех энергетических режимов (режимы 6, 4 и 2 из п. 4.1) с фиксированными значениями коэффициента восстановления магнитной энергии  $k_b$ , позволят выявить области изменения указанных четырех электромеханических ха-

рактик уже для всех энергетических режимов от режима 1 до режима 7 включительно [115].

Для импульсного ЛЭМД с продольным магнитным полем сначала получим зависимости тока обмотки возбуждения  $i(x)$  для энергетических режимов 6, 4 и 2.

Для энергетического режима 6 ( $I = \text{const}$ ) ток обмотки возбуждения:

$$i(x) = I_{\text{тр}(6)}. \quad (4.36)$$

Для режима 4 с постоянной магнитной энергией ( $W_m = \text{const}$ ) справедливо с учетом (4.35) выражение для тока трогания  $I_{\text{тр}} = I_{\text{тр}(4)}$ :

$$W_m = \frac{a \cdot I_{\text{тр}(4)}^2}{2x_k}. \quad (4.37)$$

С другой стороны эта же энергия будет при другом токе:

$$W_m = 0,5L(x) \cdot i^2(x). \quad (4.38)$$

Из (4.38) с учетом (4.37) найдем зависимость тока обмотки возбуждения  $i(x)$  от тока трогания для режима 4:

$$i(x) = I_{\text{тр}(4)} \cdot \left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^{0,5}. \quad (4.39)$$

Для энергетического режима 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) имеем для тока трогания  $I_{\text{тр}} = I_{\text{тр}(2)}$ :

$$\Psi = L_n \cdot I_{\text{тр}(2)}.$$

С другой стороны это же потокосцепление выразим для другого тока:

$$\Psi = L(x) \cdot i(x),$$

откуда 
$$i(x) = \frac{L_n}{L(x)} \cdot I_{\text{тр}(2)}. \quad (4.51)$$

Подставляя в (4.40) выражение (4.34) с учетом (4.35), получим зависимость тока  $i(x)$  для рассматриваемого преобразователя для режима 2 ( $\Psi = \text{const}$ ):

$$i(x) = I_{\text{тр}(2)} \cdot \left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right). \quad (4.41)$$

Сравнивая выражения (4.36), (4.39) и (4.41), видим, что они обладают

одинаковой структурой, которая определяется коэффициентом восстановления магнитной энергии  $k_b$ , присущим данному энергетическому режиму. Тогда обобщенное выражение для тока будет:

$$i(x) = I_{\text{тр(реж)}} \cdot \left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^{0,5 \cdot (1-k_b)}. \quad (4.42)$$

Используя известное выражение для мгновенного электромагнитного тягового усилия в виде функции перемещения:

$$F_3(x) = 0,5 i^2(x) \cdot \frac{dL(x)}{dx},$$

а также выражения (4.34), (4.36), (4.39) и (4.41), получим соотношения  $F_3(x)$  для трех рассматриваемых энергетических режимов 6, 4 и 2 соответственно:

$$F_3(x) = \frac{a \cdot I_{\text{тр(6)}}^2}{2 \cdot x_k^2} \cdot \frac{1}{\left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^2}; \quad (4.43)$$

$$F_3(x) = \frac{a \cdot I_{\text{тр(4)}}^2}{2 \cdot x_k^2} \cdot \frac{1}{\left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^1}; \quad (4.44)$$

$$F_3(x) = \frac{a \cdot I_{\text{тр(2)}}^2}{2 \cdot x_k^2} \cdot \frac{1}{\left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^0}. \quad (4.45)$$

Сравнивая эти три выражения, легко получить обобщенную формулу тягового усилия импульсного ЛЭМД, работающего по любому из энергетических режимов 1–7, которым соответствуют определенные ранее значения коэффициента восстановления магнитной энергии  $k_b$  и тока трогания:

$$F_3(x) = \frac{a \cdot I_{\text{тр(реж)}}^2}{2 \cdot x_k^2} \cdot \frac{1}{\left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^{1+k_b}} \quad (4.46)$$

Для нахождения скорости перемещения якоря массой  $m_a$  в зависимости от координаты  $x$  используем известное выражение

$$V(x) = \sqrt{\frac{2 \int F_3(x) dx}{m_a}}, \quad (4.47)$$

в которое подставим ранее найденное обобщенное выражение электромагнитного тягового усилия (4.46) для энергетических режимов импульсного ЛЭМД, получим:

$$V(x) = \sqrt{\frac{a \cdot I_{\text{тр(реж)}}^2}{m_a \cdot x_K^2} \int \left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K} \right)^{-(1+k_B)} dx}. \quad (4.48)$$

Рассмотрим подкоренное выражение из (4.48) и возьмем интеграл:

$$V^2(x) = \frac{a \cdot I_{\text{тр(реж)}}^2}{m_a \cdot x_K^2} \int \left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K} \right)^{-(1+k_B)} dx = \frac{a \cdot I_{\text{тр(реж)}}^2}{m_a \cdot x_K^2} \frac{1}{\left( -\frac{1}{x_K} \right) \cdot (-k_B)} \cdot \left( -\frac{x}{x_K} + \frac{m}{m-1} \right)^{-k_B} + C. \quad (4.49)$$

В уравнении (4.49) найдем постоянную интегрирования  $C$  из начальных условий, когда начальная скорость якоря  $V(0) = 0$ . Тогда (4.49) примет вид:

$$0 = -\frac{a \cdot I_{\text{тр(реж)}}^2}{m_a \cdot x_K^2} \frac{1}{\left( -\frac{1}{x_K} \right) \cdot (-k_B)} + C,$$

откуда  $C = -\frac{a \cdot I_{\text{тр(реж)}}^2}{m_a \cdot x_K \cdot k_B}.$

В итоге выражение скорости движения якоря (4.48) примет вид:

$$V(x) = I_{\text{тр(реж)}} \sqrt{\frac{a}{m_a \cdot x_K \cdot k_B} \cdot \left( \left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K} \right)^{-k_B} - 1 \right)}, \text{ где } k_B \neq 0. \quad (4.50)$$

Например, для энергетического режима 6 ( $I = \text{const}$ ) и значения  $k_B = 1$  из обобщенного выражения (4.50) получим выражение скорости:

$$V(x)_{(6)} = I_{\text{тр(6)}} \cdot \sqrt{\frac{a}{m_a \cdot x_K} \cdot \left[ \left( 1 / \left( \frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K} \right) \right) - 1 \right]}. \quad (4.51)$$

Однако полученное выражение (4.50) нельзя использовать для определения скорости движения якоря применительно к энергетическому режиму 4 ( $W_M = \text{const}$ ), для которого  $k_B = 0$ . Поэтому воспользовавшись выражением (4.47) и подставив в него значение тягового усилия для этого режима, получим:



$$V(x)_{(4)} = I_{\text{тр}(4)} \cdot \sqrt{\frac{a}{m_a \cdot x_K} \cdot \ln \frac{1}{\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)}}. \quad (4.52)$$

Следовательно, обобщенными выражениями для скорости будут (4.50) для  $k_B \neq 0$  и (4.52) для  $k_B = 0$ .

В частности, для энергетического режима 2 ( $\Psi = \text{const}$ ), когда  $k_B = -1$ , получим из (4.50):

$$V(x)_{(2)} = I_{\text{тр}(2)} \cdot \sqrt{\frac{a \cdot x}{m_a \cdot x_K^2}}. \quad (4.53)$$

И, наконец, используя формулу для механической мощности  $P_{\text{мех}}(x) = F_3(x) \cdot V(x)$ , обобщенные выражения усилия  $F_3(x)$  (4.46) и скорости  $V(x)$  (4.50) для  $k_B \neq 0$  и (4.52) для  $k_B = 0$ , определим соответствующие обобщенные выражения.

Для  $k_B \neq 0$  получим:

$$P_{\text{мех}}(x) = \frac{I_{\text{тр(реж)}}^3}{2 \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)^{1+k_B}} \cdot \sqrt{\frac{a^3}{m_a \cdot x_K^5 \cdot k_B} \cdot \left(\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)^{-k_B} - 1\right)}. \quad (4.54)$$

Для режимов, когда  $k_B = 0$ , получим с учетом (4.52):

$$P_{\text{мех}}(x) = \frac{I_{\text{тр(реж)}}^3}{2 \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)} \cdot \sqrt{\frac{a^3}{m_a \cdot x_K^5} \cdot \ln \frac{1}{\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)}}. \quad (4.55)$$

Для энергетического режима 6 ( $I = \text{const}$ ) при  $k_B = 1$  из (4.54) получим:

$$P_{\text{мех}}(x)_{(6)} = \frac{I_{\text{тр}(6)}^3}{2 \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{a^3}{m_a \cdot x_K^5} \cdot \left(\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)^{-1} - 1\right)}. \quad (4.56)$$

Для энергетического режима 4 ( $W_m = \text{const}$ ) при  $k_B = 0$  из (4.55) получим:

$$P_{\text{мех}}(x)_{(4)} = \frac{I_{\text{тр}(4)}^3}{2 \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)} \cdot \sqrt{\frac{a^3}{m_a \cdot x_K^5} \cdot \ln \frac{1}{\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)}}. \quad (4.57)$$

Для энергетического режима 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) при  $k_B = -1$  из (4.54) получим:

$$P_{\text{мех}}(x)_{(2)} = \frac{I_{\text{тр}(2)}^3}{2} \cdot \sqrt{\frac{a^3}{m_a \cdot x_K^5} \cdot \left(\frac{x}{x_K}\right)}. \quad (4.58)$$

Обобщенные аналитические выражения электромеханических характеристик (4.42), (4.46), (4.50), (4.52), (4.54) и (4.55) для всех энергетических режимов импульсного ЛЭМД с продольным магнитным полем сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Обобщенные аналитические выражения электромеханических характеристик импульсного ЛЭМД с продольным магнитным полем

Характеристика	Аналитическое выражение
ток возбуждения	$i(x) = I_{\text{тр(реж)}} \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)^{0,5 \cdot (1-k_B)}$
тяговое усилие	$F_3(x) = \frac{a \cdot I_{\text{тр(реж)}}^2}{2 \cdot x_K^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)^{1+k_B}}$
скорость перемещения якоря	$V(x) = I_{\text{тр(реж)}} \sqrt{\frac{a}{m_a \cdot x_K \cdot k_B} \cdot \left(\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)^{-k_B} - 1\right)}, \text{ где } k_B \neq 0;$ $V(x)_{(4)} = I_{\text{тр}(4)} \cdot \sqrt{\frac{a}{m_a \cdot x_K} \cdot \ln \frac{1}{\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)}}, \text{ где } k_B = 0$
механическая мощность	$P_{\text{мех}}(x) = \frac{I_{\text{тр(реж)}}^3}{2 \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)^{1+k_B}} \cdot \sqrt{\frac{a^3}{m_a \cdot x_K^5 \cdot k_B} \cdot \left(\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)^{-k_B} - 1\right)}, \text{ где } k_B \neq 0;$ $P_{\text{мех}}(x)_{(4)} = \frac{I_{\text{тр}(4)}^3}{2 \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)} \cdot \sqrt{\frac{a^3}{m_a \cdot x_K^5} \cdot \ln \frac{1}{\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_K}\right)}}, \text{ где } k_B = 0$

Значения коэффициента восстановления, определяющие каждый из семи энергетических режимов, представлены в п. 4.1 (Таблица 4.1). Известно, что большинство импульсных ЛЭМД работают в энергетических режимах от второго до шестого (п. 4.1), из них режимам 2 ( $\Psi = \text{const}$ ), 4 ( $W_m = \text{const}$ ) и 6 ( $I = \text{const}$ ) соответствуют не диапазоны изменения, а определенные фиксированные значения коэффициента восстановления  $k_B$ , равные соответственно – 1; 0 и 1 на границе секторов (Рисунок 4.1), а смежным с ними режимам 3 и 5 соответствуют



( $\Psi = \text{const}$ ) эти кратности одинаковы, то есть  $k_{(2)} = m$ , для режима 4 ( $W_m = \text{const}$ ) получится  $k_{(4)} < m$ , а для режима 6 ( $I = \text{const}$ ) будет  $k_{(6)} = 1$ .

Тогда для магнитной системы импульсного ЛЭМД, имеющей кратность изменения индуктивности, например,  $m = 4,45$  ( $\Theta_k = 75^\circ$ ,  $\Theta_n = 40^\circ$ , Рисунок 4.15), кратность изменения тока обмотки возбуждения для режима  $\Psi = \text{const}$  будет такой же, то есть  $k_{(2)} = 4,45$  [99]. Следовательно, относительный ток трогания для режима  $\Psi = \text{const}$  (режим 2) будет наибольшим и равным  $I_{\text{тр}(2)*} = 1$ , тогда как для режима  $I = \text{const}$  (режим 6) относительный ток трогания, соответствующий потокоцеплению  $\Psi_k$ , уменьшится и будет  $I_{\text{тр}(6)*} = 0,22$ , то есть:

$$I_{\text{тр}(6)} = \frac{1}{m} \cdot I_{\text{тр}(2)}. \quad (4.59)$$

Определим относительный ток трогания  $I_{\text{тр}(4)*}$  для режима 4 ( $W_m = \text{const}$ ) из условия равенства магнитных энергий для начального и конечного положений якоря, выраженный через ток трогания  $I_{\text{тр}(2)}$ :

$$0,5L_n \cdot I_{\text{тр}(4)}^2 = 0,5L_k \cdot I_{\text{тр}(6)}^2,$$

откуда в относительной форме получим:

$$I_{\text{тр}(4)*} = I_{\text{тр}(6)*} \cdot \sqrt{m} = \frac{I_{\text{тр}(2)*}}{\sqrt{m}}. \quad (4.60)$$

Если считать  $m = 4,45$  и  $I_{\text{тр}(6)*} = 0,22$ , то получим:

$$I_{\text{тр}(4)*} = I_{\text{тр}(6)*} \cdot \sqrt{m} = 0,22 \cdot \sqrt{4,45} \approx 0,46.$$

Следовательно, сравнение энергетических режимов по четырем рассматриваемым электрохимическим характеристикам еще нельзя выполнить непосредственно по выше полученным формулам из-за того, что в них токи трогания не уточнены. Уточнение значений этих токов возможно лишь для режимов 2, 4 и 6 с учетом конструктивного параметра  $m$  по формулам (4.59) и (4.60). Для режимов 1, 3, 5 и 7 возможно лишь ориентировочное определение тока трогания из полученных графически областей изменения тока обмотки возбуждения  $i(x)$

(Рисунок 4.16, область режима 3 выделена заливкой).

Уточненные формулы электромеханических характеристик представим в относительных единицах, выбрав в качестве базисной величины ток  $I_{\text{тр}(2)}$  для режима  $\Psi=\text{const}$ . Результаты расчета электромеханических характеристик для режимов 6, 4 и 2 представлены в таблице 4.5 и на рисунках 4.16...4.19 для режимов 6, 4, и 2 – в виде границ и для режимов 1,3, 5 и 7 – в виде областей изменения.

Таблица 4.5 – Безразмерные электромеханические характеристики импульсного ЛЭМД с продольным магнитным полем для энергетических режимов 6 ( $I=\text{const}$ ), 4 ( $W_m = \text{const}$ ) и 2 ( $\Psi=\text{const}$ )

Энергетический режим	$I=\text{const}$ (режим 6)	$W_m = \text{const}$ (режим 4)	$\Psi=\text{const}$ (режим 2)
Ток обмотки возбуждения $i(x)_*$ , о.е.	$\frac{1}{m}$	$\frac{1}{\sqrt{m}} \cdot \sqrt{\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k}}$	$\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k}$
Сила тяги $F_3(x)_*$ , о.е.	$\frac{1}{m^2 \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k}\right)^2}$	$\frac{1}{m \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k}\right)}$	1
Скорость якоря $V(x)_*$ , о.е.	$\frac{1}{m} \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k}} - 1}$	$\frac{1}{\sqrt{m}} \cdot \sqrt{\ln \left( \frac{1}{\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k}} \right)}$	$\sqrt{\frac{x}{x_k}}$
Механическая мощность $P_{\text{мех}}(x)_*$ , о.е.	$\frac{1}{m^3 \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k}} - 1}$	$\frac{1}{m^{3/2} \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k}\right)} \cdot \sqrt{\ln \left( \frac{1}{\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k}} \right)}$	$\sqrt{\frac{x}{x_k}}$

Анализ полученных выражений электромеханических характеристик показывает, что формы тока и усилия на интервале движения якоря (Рисунки 4.16, 4.17) влияют на скорость его движения (Рисунок 4.18), что в свою очередь влияет на кинетическую энергию двигателя.

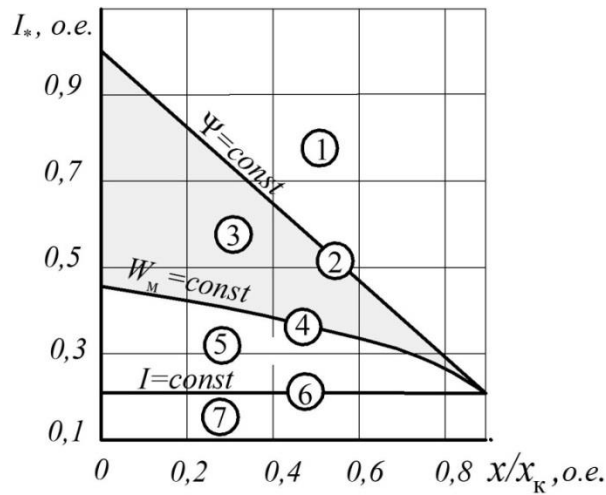


Рисунок 4.16 – Границы и области изменения тока обмотки возбуждения от перемещения якоря импульсного ЛЭМД для режимов (1)...(7) и  $m=4,45$

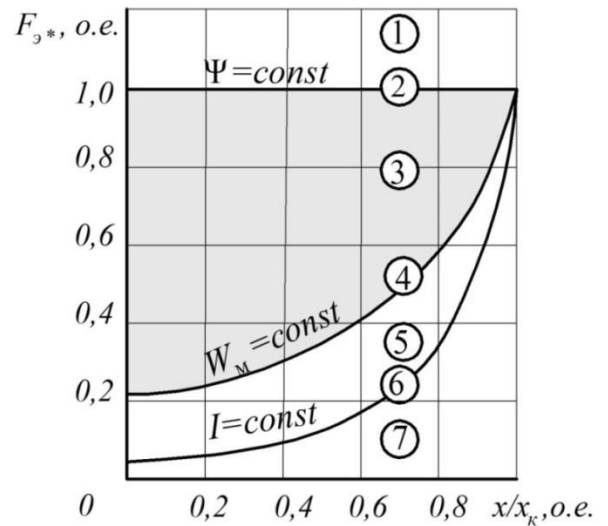


Рисунок 4.17 – Границы и области изменения тягового усилия от перемещения якоря импульсного ЛЭМД для режимов (1)...(7) и  $m=4,45$

Из рисунков 4.17 и 4.18 следует, что режимы 4...7 характеризуются значительными изменения тягового усилия по ходу движения якоря. Это приводит к сильному изменению скорости якоря и, как следствие, – к значительной неустойчивости энергии при изменении рабочего хода [15; 132]. Лишь режимы 3 и 2 обладают не только большими начальными скоростями, но и большей стабильностью энергии рабочего хода.

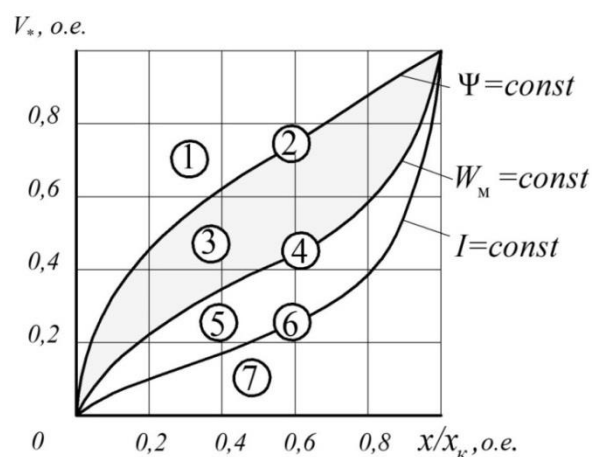


Рисунок 4.18 – Границы и области изменения скорости движения якоря импульсного ЛЭМД от его перемещения для режимов (1)...(7) и  $m=4,45$

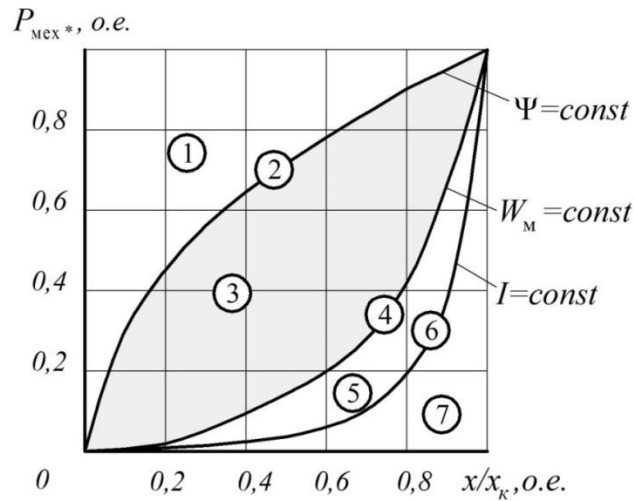


Рисунок 4.19 – Границы и области изменения механической мощности от перемещения якоря импульсного ЛЭМД для режимов (1)...(7) и  $m=4,45$

Покажем это на примере машин ударного действия и машин с компрессорной (насосной) нагрузкой. В машинах ударного действия технологический процесс совершается в заключительной стадии рабочего хода, которая составляет обычно  $(0,85 \dots 0,9)x_k$ . Поэтому на указанном интервале рабочего хода оценим величину нестабильности скорости движения, а затем и энергии удара применительно к трем рассматриваемым энергетическим режимам 6, 4 и 2.

Относительные изменения скорости движения на участке  $(0,85 \dots 0,9)x_k$  для каждого из трех режимов определим, используя выражения скорости из таблицы 4.4:

$$\Delta V(x)_* = \frac{V(0,9)_* - V(0,85)_*}{V(0,85)_*} \cdot 100\%.$$

Так, для режима 6  $\Delta V(x)_{(6)*} = \frac{0,67 - 0,53}{0,53} \cdot 100\% = 26,4\%;$

для режима 4  $\Delta V(x)_{(4)*} = \frac{0,72 - 0,65}{0,65} \cdot 100\% = 10,8\%;$

для режима 2  $\Delta V(x)_{(2)*} = \frac{0,95 - 0,92}{0,92} \cdot 100\% = 3,3\%.$

Тогда относительные изменения энергии удара  $\Delta A_{y*}$ , характеризующие её нестабильность, на данном участке движения для каждого из рассматриваемых режимов соответственно будут:

$$\Delta A_y(x)_{(6)*} = 60\%; \quad \Delta A_y(x)_{(4)*} = 17\% \text{ и } \Delta A_y(x)_{(2)*} = 7\%. \quad (4.61)$$

Полученные значения свидетельствуют о низкой стабильности энергии рабочего хода ударной машины для режима 6 ( $I = \text{const}$ ). Наоборот, режим 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) обладает лучшими показателями по стабильности энергии удара, что освобождает этот режим от дополнительных мероприятий по стабилизации  $A_y$ , повышает качество технологических операций, например, прессования, клеймения [133].

В работе [15] выполнены экспериментальные исследования стабильности энергии рабочего хода, которая обеспечивает в свою очередь стабильность амплитуды хода якоря импульсного ЛЭМД в составе электромагнитного привода стана холодной прокатки труб роликового типа ХПТР 8-15. Исследования показали, что такой привод при допустимом отклонении амплитуды хода до 5% и соответствующем отклонении кинетической энергии рабочего хода якоря до 9...10% не обеспечивает требуемой стабильности энергии рабочего хода. В этом случае нестабильность энергии составляла 19...21% при отсутствии дополнительных буферных устройств, что в два раза хуже требуемой. Лишь применение дополнительно пневматических буферных устройств снижает нестабильность до требуемых значений.

Как видно из (4.61), работа импульсного ЛЭМД в энергетических режимах 2 и 3 обеспечивает лучшие показатели стабильности машины без применения дополнительных устройств.

В отличие от ударной нагрузки компрессорная или насосная нагрузка создаёт значительное противодействующее усилие, как в начале рабочего хода, так и по ходу движения якоря. Поэтому для таких машин наиболее целесообразен режим 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) с повышенным значением начального тягового усилия. Повышенное значение начального тягового усилия (Рисунок 4.17) способствует еще и лучшему быстрдействию привода. Согласно [134] возможно улучшить быстрдействие, сократив время рабочего хода до 80% для режима 2 по сравнению с режимом 6 при условии сохранения одной и той же механической работы на одном и том же перемещении якоря массой  $m_a$ .



Таким образом, впервые получены обобщенные аналитические выражения для тока возбуждения, тягового усилия, скорости перемещения якоря и механической мощности для всех энергетических режимов импульсного ЛЭМД с продольным магнитным полем, выраженные через коэффициент восстановления магнитной энергии. Энергетические режимы 2 и 3 обеспечивают высокую стабильность энергии удара. Применение энергетического режима 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) по сравнению с режимом 6 ( $I = \text{const}$ ) повышает быстродействие электромагнитного привода за счет снижения времени рабочего хода до 80%.

#### **4.6 Сравнение магнитных циклов импульсного ЛЭМД с учетом мощности потерь в его обмотке**

В работах [99; 118] на ступени преобразования магнитной энергии в механическую для исследуемого ЛЭМД в случае линейной магнитной цепи и без потерь в магнитопроводе предложены критерии оценки эффективности такого преобразования. Для установленных пяти элементарных магнитных циклов получены расчетные выражения этих критериев, по которым возможно сравнение импульсных ЛЭМД, работающих по каждому из этих циклов. Вид цикла зависит от соотношения тягового и противодействующего усилий, приложенных к якорю ЛЭМД, а также от массы якоря и может быть сформирован устройством питания и управления.

Ранее установлено, что энергетический режим с постоянным потокоцеплением  $\psi = \text{const}$  (режим 2) обладает высокими магнитным КПД (Рисунок 4.8) и механической работой (Рисунок 4.5) [99; 118]. Покажем, что комбинированный магнитный цикл, образованный из режимов 6 ( $I = \text{const}$ ) и 2 ( $\psi = \text{const}$ ), по сравнению с режимом 2 ( $\psi = \text{const}$ ) позволит иметь приемлемые электрические потери в обмотке при преобразовании электрической энергии в магнитную.

Оценим эффективность преобразования магнитной энергии рабочих зазоров в механическую энергию импульсного ЛЭМД с учетом потерь в его обмотке. Для этого сравним указанные режимы, определяемые траекториями 0-2-4-0

( $\Psi = \text{const}$ ) и 0-1-3-4-0 (комбинированный магнитный цикл) (Рисунок 4.20) и имеющие одинаковые конечные потокоцепления  $\psi = \psi_m$ . В качестве критериев сравнения примем относительные значения механической работы за рабочий ход якоря импульсного ЛЭМД:

$$A_* = A_{\text{мех}} / A_{\text{макс}} \quad (4.62)$$

и мощности потерь в обмотке ЛЭМД при этих же условиях:

$$\Delta P_* = \Delta P / P_{\text{макс}},$$

где  $A_{\text{макс}}$ ,  $P_{\text{макс}}$  – максимальные значения механической работы и мощности потерь в обмотке, соответствующие функционированию однообмоточного импульсного ЛЭМД по режиму  $\Psi = \text{const}$ . Представим выражение (4.62) через относительные значения тока  $I_* = I / I_m$  и потокоцепления  $\Psi_* = \Psi / \Psi_m$ .  $\Psi_m$  и  $I_m$  – их максимальные значения (Рисунок 4.21). Для режима  $\Psi = \text{const}$  справедливо  $\Psi_m / I_m = \Psi'_m / I'_m$ , откуда следует:

$$\Psi_* = I_*. \quad (4.63)$$

Механическая работа импульсного ЛЭМД, соответствующая его функционированию по комбинированному циклу (Рисунок 4.21), будет:

$$A_{\text{мех}} = A_{\text{макс}} - 0,5(I_m - I'_m) \cdot (\Psi_m - \Psi'). \quad (4.64)$$

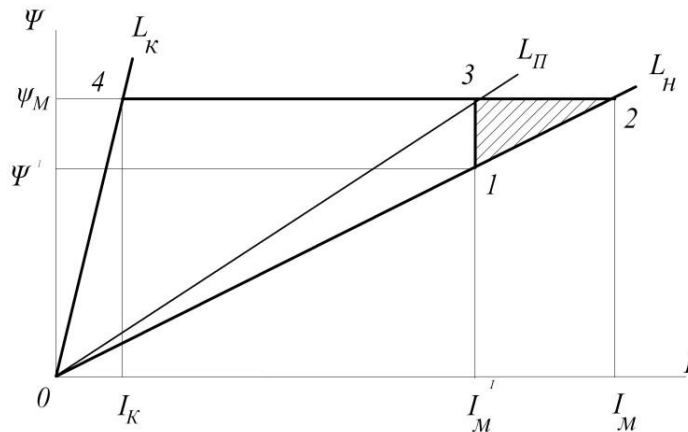


Рисунок 4.20 – Режим  $\Psi = \text{const}$  (0-2-4-0) и комбинированный магнитный цикл (0-1-3-4-0) при ненасыщенной магнитной цепи

Используя полученное в [118; 135] соотношение (4.65) для работы

$$A_{\text{макс}} = 0,5 \cdot \Psi_m \cdot (I_m - I_K), \quad (4.65)$$

выразим (4.62) с учетом (4.64) и получим

$$A_* = 1 - (1 - \Psi_*) \cdot (1 - I_*) \cdot (1 - I_K / I_M). \quad (4.66)$$

Так как  $I_K \ll I_M$  (например, для кратности изменения индуктивности  $m = 10$  согласно [118; 135] кратность изменения тока  $k$  также равна 10 и  $I_K = I_M / k = 0,1 \cdot I_M$ ), то  $1 - I_K / I_M \approx 1$ . Следовательно, выражение (4.66) примет окончательный вид:

$$A_* = 1 - (1 - I_*)^2. \quad (4.67)$$

Выразим в относительных единицах электрическую мощность потерь в обмотке ЛЭМД для комбинированного цикла, приняв за базу значение мощности потерь в обмотке  $P_{\max} = R \cdot I_M^2$  для режима  $\Psi = \text{const}$ , тогда

$$\Delta P_* = R \cdot I^2 / (R \cdot I_M^2) = I_*^2. \quad (4.68)$$

Зависимости относительных механической работы и мощности потерь при работе ЛЭМД по комбинированному циклу изображены на рисунке 4.21.

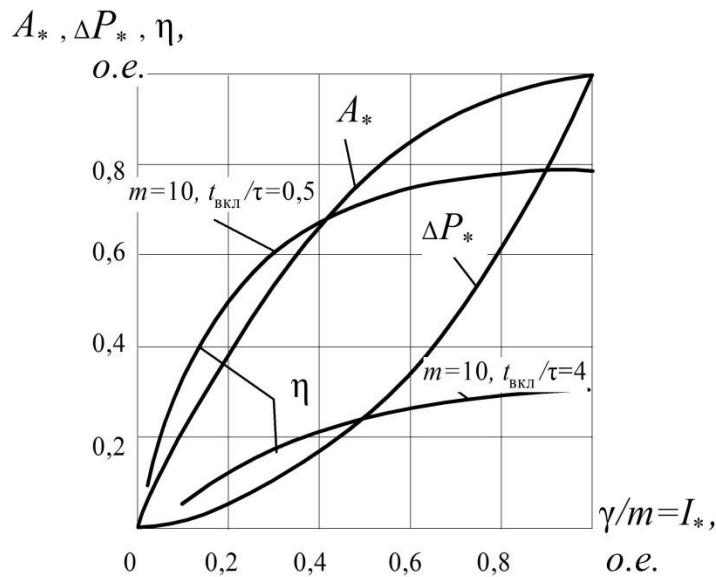


Рисунок 4.21 – Зависимости КПД и механической работы, мощности потерь от тока для режима  $\Psi = \text{const}$  и комбинированного магнитного цикла

Для режима  $\Psi = \text{const}$  относительные величины работы и мощности потерь в обмотке неизменны и приняты за единицу.

Анализ этих зависимостей показывает, что в диапазоне изменения отно-

сительного тока  $0,5 < I_* < 1$  работа меняется в диапазоне  $0,75 < A_* < 1$ , тогда как относительная мощность потерь – в диапазоне  $0,25 < \Delta P_* < 1$ . При функционировании двигателя по комбинированному циклу с током трогания  $I'_M$  (Рисунок 4.20), сниженным, например, на 30 % по сравнению с максимальным током  $I_M$ , относительная механическая работа снижается всего на 8 %, в то время как мощность потерь в обмотке – на 51 %.

Таким образом, функционирование ЛЭМД по комбинированному магнитному циклу (Рисунок 4.20), составленному из режимов 6 ( $I = \text{const}$ ) и 2 ( $\Psi = \text{const}$ ), дает возможность двигателю обеспечить незначительное снижение механической работы при значительном снижении мощности потерь в обмотке по сравнению с режимом 2 ( $\Psi = \text{const}$ ).

С целью дальнейшего сравнения эффективности преобразования электрической энергии в механическую работу учтем потери в обмотке импульсного ЛЭМД, работающего как по комбинированному циклу, так и по режиму  $\Psi = \text{const}$  (Рисунок 4.20), получим для них расчетные значения КПД двигателя:

$$\eta = 1 / (1 + Q / A), \quad (4.69)$$

где  $Q = R \int_0^{t_{\text{вкл}}} i^2 dt$  – потери энергии в обмотке за время включения.

Для комбинированного цикла соотношение (4.69) с учетом выражения, связывающего коэффициент эффективности цикла  $\eta_{\text{ц}}$ , механическую работу  $A$  и ее предельное значение  $A_{\text{П}}$  [136], примет вид:

$$\eta = 1 / \left( 1 + \frac{R(I'_M)^2 \cdot t_{\text{вкл}}}{k_a^2 \cdot \eta_{\text{ц}} \cdot I'_M \cdot \Psi_M} \right), \quad (4.70)$$

где  $t_{\text{вкл}}$  – время включения двигателя;  $k_a$  – коэффициент амплитуды импульса тока обмотки;  $I'_M$  – амплитудное значение импульса тока. Отношение  $\Psi_M / I'_M$  в (4.70) есть статическая индуктивность  $L_{\text{П}}$  (Рисунок 4.20), соответствующая положению якоря в момент переключения с режима  $I = \text{const}$  на режим  $\Psi = \text{const}$ .

Из (4.70), выражая индуктивность  $L_{\Pi}$  через конструктивный  $m$ , режимный  $\gamma = L_K / L_{\Pi}$  параметры, получим:

$$\eta = 1 / (1 + \frac{\gamma \cdot t_{\text{ВКЛ}} / \tau_H}{k_a^2 \cdot \eta_{\text{ц}} \cdot m}), \quad (4.71)$$

где  $\tau_H = L_H / R$  – электромагнитная постоянная двигателя на этапе трогания. Используя полученное в [107] соотношение для коэффициента эффективности  $\eta_{\text{ц}}$  данного комбинированного цикла, представим выражение (4.71) для КПД:

$$\eta = 1 / \left( 1 + \frac{t_{\text{ВКЛ}} / \tau_H}{k_a^2 \cdot (m / \gamma - 0,5 \cdot m / \gamma^2 - 0,5)} \right). \quad (4.72)$$

Для рассматриваемого режима  $\Psi = \text{const}$  с учетом его особенностей ( $L_{\Pi} = L_H, \gamma = m$ ) и полученного в [118; 135] выражения коэффициента  $\eta_{\text{ц}}$ , равного  $\eta_{\text{ц}} = 0,5(1 - 1/m)$ , КПД двигателя будет:

$$\eta = 1 / \left( 1 + \frac{2 \cdot t_{\text{ВКЛ}} / \tau_H}{k_a^2 \cdot (1 - 1/m)} \right). \quad (4.73)$$

Однако пользоваться непосредственно выражениями (4.72) и (4.73) для сравнения рассматриваемых режимов по величине КПД двигателя нельзя, так как в них при одинаковой кратности изменения индуктивности  $m = \text{const}$  предполагается равенство коэффициентов амплитуды  $k_a$  импульса тока обмотки. В действительности при изменении параметра  $\gamma$  в (4.72) меняется и амплитудное значение тока  $I'_M$ , следовательно, и коэффициент  $k_a$ , пропорциональный этому току  $I'_M$ . Для учета изменения  $k_a$  отметим особенности сравниваемых циклов. Для комбинированного цикла имеем  $\gamma = k = I'_M / I_K$ , откуда

$$I'_M = \gamma \cdot I_K. \quad (4.74)$$

Аналогично для режима  $\Psi = \text{const}$  имеем  $k = m$ , откуда

$$I_K = I_M / m. \quad (4.75)$$

Тогда выражение (4.74) с учетом (4.75) примет вид:

$$I'_M = (\gamma / m) \cdot I_M. \quad (4.76)$$

Отношение  $\gamma/m$  в (4.76) применительно к комбинированному циклу будет учитывать изменение  $k_a$  при изменении момента переключения  $\gamma = var$ . Например, для крайних значений момента переключения  $\gamma = m$  и  $\gamma = 1$  получим из выражения (4.76) соотношение  $I'_m = I_m$ , что соответствует режиму  $\Psi = const$ , и соотношение  $I'_m = I_m/m$ , что соответствует режиму  $I = const$ . Промежуточные значения параметра  $\gamma$  соответствуют исследуемому комбинированному циклу, и выражение для КПД (4.72) станет:

$$\eta = 1 / [1 + \frac{t_{вкл} / \tau_H}{k_a^2 \cdot (\gamma / m - 0,5 / m - 0,5 \cdot \gamma^2 / m^2)}]. \quad (4.77)$$

Полученные выражения (4.73) и (4.77) используем для сравнения рассматриваемых режимов по величине КПД. На рисунке 4.22 приведены зависимости КПД импульсного ЛЭМД от параметров  $\gamma = k$  и относительного времени включения  $t_{вкл} / \tau_H$  обмотки для параметров  $m = 10$  и  $k_a = 2$  при работе ЛЭМД как по комбинированному циклу, так и по режиму  $\Psi = const$ .

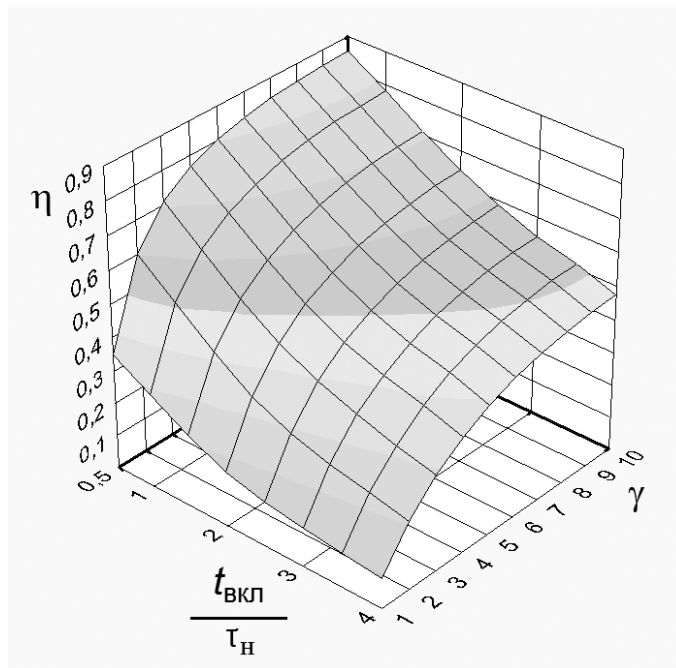


Рисунок 4.22 – Зависимости КПД двигателя от параметров  $\gamma$ ,  $k$  и относительного времени включения  $t_{вкл} / \tau_H$  обмотки для кратности  $m = 10$  при работе по комбинированному циклу и режиму  $\psi = const$  (для  $\gamma = k = 10$ ,  $k_a = 2$ )

Значения КПД импульсного ЛЭМД для режима  $\Psi = \text{const}$  максимальны (Рисунок 4.22) и соответствуют значениям  $\gamma = k = 10$  и  $k_a = 2$  (линия пересечения поверхности с правой вертикальной плоскостью). Из анализа зависимостей (4.77) следует, что с ростом режимного параметра  $\gamma$  КПД двигателя, функционирующего по комбинированному циклу, также растет и при этом монотонно приближается к своему пределу, определяемому значениями  $t_{\text{вкл}}/\tau_{\text{H}}$  и ограниченному соотношением  $\gamma = m$ , соответствующими режиму  $\Psi = \text{const}$ . Причем для  $\gamma > 4..5$  рост КПД в бóльшей степени определяется параметром  $t_{\text{вкл}}/\tau_{\text{H}}$ . С его уменьшением КПД растет, приближаясь к единице, что подтверждается исследованиями [14].

При  $t_{\text{вкл}} < (2..3)\tau_{\text{H}}$  интенсивность роста КПД повышается. Это объясняется тем, что с увеличением времени включения коэффициент преобразования электрической энергии в магнитную  $\lambda = W_{\text{м}}/W_{\text{эл}}$  падает из-за роста потерь в обмотке ЛЭМД, что подтверждается теоретическими исследованиями [9; 50; 137]. Относительное время выбирают исходя из компромисса между уровнями преобразованной  $\lambda$  и запасаемой магнитной энергии. Например, согласно [9] рекомендуется относительное время выбирать в диапазоне 0,8...1,5. При значении  $t_{\text{вкл}}/\tau_{\text{H}} > 1,1$  энергия электрических потерь в обмотке двигателя начинает превышать запасаемую в его рабочих зазорах магнитную энергию, и КПД становится ниже 50 %. Однако, как отмечалось в п. 3.4, реализация энергетических режимов с малым временем включения (форсировка) затруднительна из-за возрастания потерь от вихревых токов в массивном магнитопроводе и необходимости ограничения амплитуды напряжения питающего импульса ниже значения 1000 В.

Из сопоставления выражений (4.87) и (4.74) следует [138]:

$$I_* = \gamma / m. \quad (4.78)$$

Тогда КПД импульсного ЛЭМД, работающего по комбинированному циклу, выразим через относительный ток и получим

$$\eta = 1 / [1 + \frac{t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{Н}}}{k_a^2 \cdot (I_* - 0,5 / m - 0,5 \cdot I_*^2)}] \quad (4.79)$$

Зависимости КПД импульсного ЛЭМД от относительного тока  $I_*$  при  $m = 10$  и относительном времени включения  $t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{Н}} = 0,5$  и  $t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{Н}} = 4$  представлены на рисунке 4.21 совместно с механической работой  $A_*$  комбинированного цикла и мощностью потерь  $\Delta P_*$  в обмотке. Причем кривые  $\eta(I_*)$  аналогичны кривым  $\eta(\gamma)$ . Предельное значение КПД соответствует значению тока  $I_* = 1$  и режиму  $\Psi = \text{const}$ .

Рассмотренный комбинированный магнитный цикл наиболее близок к реальным магнитным циклам, по которым работают импульсные ЛЭМД в приводе, например, прессового [9; 50] оборудования.

Использование магнитной системы ЛЭМД с двумя рабочими зазорами обеспечивает рациональные значения конструктивного параметра магнитного цикла  $m > 3 \dots 5$  даже при небольших рабочих зазорах. Требуемые режимные параметры  $\gamma$ ,  $k_{(\text{реж})}$ , обеспечивающие совместно с конструктивным параметром  $m$  высокие энергетические показатели ЛЭМД и его регулировочные свойства, реализуются с помощью УПУ. Анализ расчетных выражений механической работы и КПД импульсного ЛЭМД с учетом мощности потерь в его обмотке на примере комбинированного цикла, образованного энергетическими режимами  $I = \text{const}$  и  $\Psi = \text{const}$ , показал, что при повышении тока трогания возрастают аккумулируемая в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД магнитная энергия и его КПД. При этом реализуются магнитные циклы с бóльшей механической работой.

### Выводы

1. Получены обобщенные аналитические выражения основных характеристик для всех энергетических режимов импульсного ЛЭМД с продольным магнитным полем.
2. Выявлены режимы, обеспечивающие высокую стабильность энергии удара.
3. Реализация энергетического режима  $\Psi = \text{const}$  (режим 2) повышает



быстродействие электромагнитного привода за счет снижения времени рабочего хода до 80% по сравнению с режимом  $I = \text{const}$  (режим б).

4. Получены в обобщённом виде количественные соотношения между электрической, магнитной и механической энергиями при их взаимном преобразовании для энергетических режимов импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного типа с ненасыщенной магнитной системой, включая двигательный и генераторный режимы, а также двигательный режим, совмещенный с генераторным, и генераторный режим, совмещенный с двигательным.

5. С помощью предложенного критерия эффективности выявлены диапазоны изменения обобщенных конструктивных и режимных параметров импульсных электромеханических преобразователей, в которых механическая работа преобразователя максимальна. Этим диапазонам соответствуют магнитные циклы с уменьшающимся по ходу движения якоря током обмотки возбуждения, среди которых самым лучшим является магнитный цикл с постоянным потокоцеплением  $\Psi = \text{const}$  (режим 2). Функционирование импульсных электромеханических преобразователей по этим циклам обеспечит повышенные энергетические характеристики, такие как, магнитный КПД, коэффициент эффективности цикла, механическая работа.

## ГЛАВА 5. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД

### 5.1 О связи энергии удара с интегральной работой импульсного ЛЭМД

Расчет динамических и энергетических характеристик импульсных линейных электромагнитных машин, выполненных даже по простым конструктивным схемам, представляет обычно сложную и трудоемкую задачу, обусловленную необходимостью решения нелинейных дифференциальных уравнений [139]. С усложнением конструктивных схем трудности решения указанных задач возрастают. В связи с этим представляет интерес применение для решения поставленных задач принципа взаимности, являющегося одним из обобщенных методов научного познания физических процессов в динамических системах [140; 141]. По этому принципу в качестве исходных данных используются статические характеристики импульсного ЛЭМД [120; 142; 143] и непосредственно определяется энергия удара импульсного ЛЭМД по статическим тяговым характеристикам  $F_{\text{ст}}(\delta)$  при  $I = \text{const}$  и интегральной работе

$$A_{\text{и}} = \int_0^{\delta} F_{\text{ст}}(\delta) d\delta.$$

На основании принципа взаимности для электромеханических систем кинетическая энергия движущихся частей  $A_{\text{к}}$  импульсного ЛЭМД должна равняться энергии  $A_{\text{е}}$ , связанной с противодействующими ЭДС [120; 142]:

$$A_{\text{к}} = A_{\text{е}} = 0,5 \cdot (A_{\text{и}} - A_{\text{п}}), \quad (5.1)$$

где  $A_{\text{к}}$  – кинетическая энергия, соответствующая площади 1-2-3-5-1 (Рисунок 5.1);  $A_{\text{е}}$  – энергия, связанная с противо-ЭДС, соответствует площади 5-3-4-1'-5;  $A_{\text{и}}$  – интегральная работа, соответствующая площади  $\delta_{\text{н}}-1'-4-\delta_{\text{к}}$ ;  $A_{\text{п}} = \int_{\delta_{\text{н}}}^{\delta_{\text{к}}} F_{\text{п}}(\delta) d\delta$  – работа по преодолению полезной нагрузки, соответствующая площади  $\delta_{\text{н}}-1-2-\delta_{\text{к}}$ .

Выражение (5.1) справедливо, если пренебречь потерями от перемagnetизации и вихревых токов, а также потерями энергии, связанными с преодолением

сил трения, то есть считать, что избыточная сила целиком участвует в ускорении движущихся частей импульсного ЛЭМД [120].

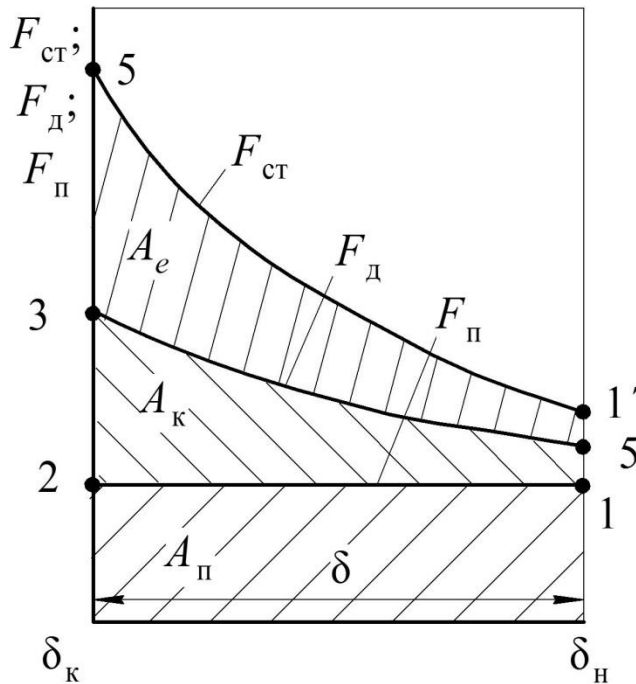


Рисунок 5.1 – Статическая  $F_{ст}$ , динамическая  $F_{д}$  и противодействующая  $F_{п}$  характеристики импульсного ЛЭМД

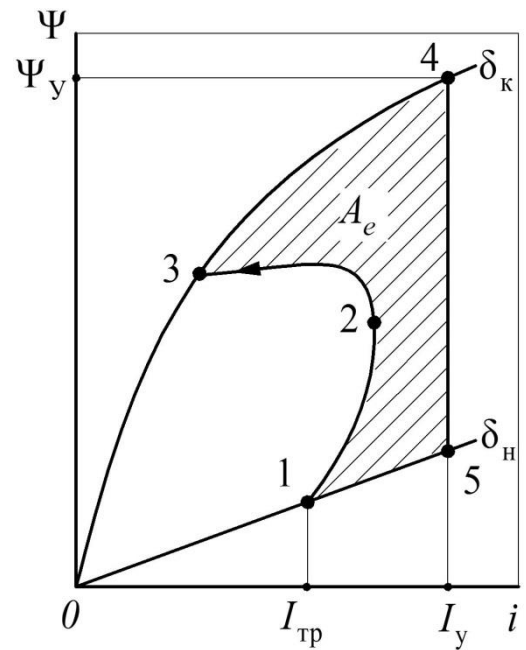


Рисунок 5.2 – Характеристики намагничивания импульсного ЛЭМД

Энергия  $A_e$ , определяемая разностью между механической энергией  $A_{и}$ , соответствующей статической характеристике  $F_{ст}(\delta)$ , и механической энергией, соответствующей динамической характеристике  $F_{д}(\delta)$ , представляет собой ту энергию, которая могла быть использована при бесконечно медленном перемещении якоря и выражается площадью 5-3-4-1'-5. В этом случае развиваемая двигателем механическая энергия подсчитывалась бы в виде интегральной работы  $A_{и}$ . В реальных условиях энергия  $A_e$  не поступает в электромеханическую систему из источника питания из-за противодействия ЭДС движения, возникающей в процессе перемещения якоря и связанных с ним частей. На характеристиках намагничивания (Рисунок 5.2) величине энергии  $A_e$  соответствует площадь 1-2-3-4-5-1, а величине  $A_к$  — площадь 0-1-2-3-0.

В работе [120] на основе взаимных соотношений [140] для электромеханических систем применительно к энергетическому режиму  $I = \text{const}$  впервые бы-

ла установлена связь (5.1) между механической (кинетической) энергией  $A_k$  и той частью магнитной энергии  $A_{и}$ , которая преобразуется в механическую работу за вычетом работы  $A_{п}$ , связанной с противодействующим усилием. В выражении (5.1) коэффициент 0,5 и характеризует степень такого преобразования.

В последующих работах [64; 144; 145] профессором Г.Г. Угаровым впервые была предложена методика предварительного расчета мощного электромагнитного молота, основу которого составляет длинноходовой бронебой двухобмоточный электромагнитный двигатель. Его основной геометрический параметр (диаметр якоря-бойка) был выражен через ряд параметров и интегральную работу  $A_{и}$ . Для связи энергии удара  $A_y$  якоря с интегральной работой  $A_{и}$ , развиваемой двигателем при мало меняющемся по ходу якоря токе возбуждения, было использовано известное соотношение (5.1). Здесь значение коэффициента перед скобкой оправданно равно 0,5, поскольку энергетическому режиму с неизменным током, рассмотренному в главе 4, соответствует невысокий магнитный КПД, подтверждающий соответствующую эффективность преобразования магнитной энергии рабочих зазоров в механическую работу. Этот магнитный КПД  $\eta_{м(6)}$  для режима 6 ( $I = \text{const}$ ) согласно [99; 118] действительно с ростом конструктивного параметра  $m$  стремится к 0,5:

$$\eta_{м(6)} = \frac{1}{1 + 1/(1 - 1/m)}. \quad (5.2)$$

В главе 4 показано, что величина магнитной энергии рабочих зазоров, преобразуемой в механическую работу, определяется энергетическим режимом импульсного ЛЭМД. Там же установлено, что наибольшая величина магнитной энергии, преобразуемой в механическую работу, и вместе с ней и наибольший КПД, характеризующий эффективность этого преобразования, соответствует вполне определенным энергетическим режимам с отрицательным значением коэффициента восстановления магнитной энергии. Это энергетические режимы 2 ( $\Psi = \text{const}$ ), 3 ( $I_n > I_k$ ,  $\Psi_k > \Psi_n$  при  $-1 < k_b < 0$ ) и 4 ( $W_m = \text{const}$ ) с уменьшающимися токами при движении якоря.

С другой стороны, энергетический режим 6, при котором снимались статические тяговые характеристики двигателя  $F_{ст} = f(\delta)$  при  $I = \text{const}$ , обладает положительным коэффициентом восстановления, равным единице. В этом режиме, как известно, лишь половина магнитной энергии, запасаемой в магнитной системе за рабочий цикл двигателя, преобразуется в механическую работу, а другая – бесполезно остается в магнитной системе к концу рабочего хода.

Однако существуют электромагнитные приводы, в которых импульсный ЛЭМД работает в энергетических режимах, отличных от режима 6. Особенно это касается режимов с уменьшающимся по ходу движения якоря током (режимы 2...4), в которых эффективность энергопреобразования существенно выше 0,5. Эти режимы реализуются, например, для редкоударных машин либо с помощью устройства удержания якоря [18; 19; 78; 106], в которых реализуется способ статического накопления магнитной энергии при неподвижном якоре, либо с помощью форсированного питания обмотки возбуждения [100; 117]. Для частоударных электромагнитных машин используется способ динамического накопления магнитной энергии при движении якоря в предшествующем цикле [50; 79; 93].

Действительно, для режима 2 согласно [99; 144] магнитный КПД  $\eta_{м(2)}$  с ростом конструктивного параметра  $m$  интенсивно стремится к 1:

$$\eta_{м(2)} = 1 - \frac{1}{m}, \quad (5.3)$$

что экспериментально подтверждено в [100; 117]: практически вся запасенная в зазорах магнитная энергия преобразуется в механическую работу.

В работе [123] для энергетического режима 4 ( $W_m = \text{const}$ ) с неизменной магнитной энергией рабочих зазоров получено выражение магнитного КПД  $\eta_{м(4)}$  в зависимости от параметра  $m$ :

$$\eta_{м(4)} = \frac{\ln m}{1 + \ln m}, \quad (5.4)$$

из которого следует, что с ростом конструктивного параметра  $m$  магнитный КПД  $\eta_{м(4)}$  также стремится к 1. Однако при значениях  $m$  от 2 до 11 этот режим уступает режиму 2 по интенсивности роста магнитного КПД.

Оценим отношение магнитных КПД для режимов 4 и 2:

$$\frac{\eta_{м(4)}}{\eta_{м(2)}} = \frac{1}{(1 + 1/\ln m) \cdot (1 - 1/m)}$$

и для наглядности построим график зависимости от кратности  $m$  (Рисунок 5.3).

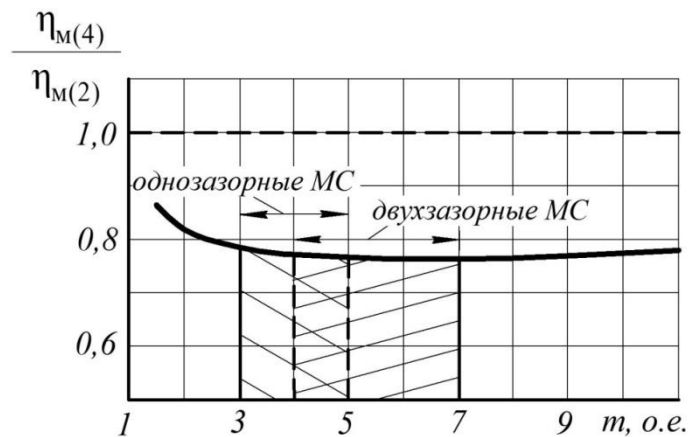


Рисунок 5.3 – Отношение магнитных КПД режимов 4 и 2 для однозазорных и двухзазорных магнитных систем

Из рисунка 5.3 видно, что в диапазоне изменения кратности  $m$  для реальных конструкций магнитной системы по критерию «магнитный КПД» энергетический режим 4 ( $W_m = \text{const}$ ) уступает режиму 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) на 22...25 %. Это относится и к однозазорным конструкциям ( $m = 3 \dots 5$ ), и к двухзазорным ( $m = 4 \dots 7$ ).

Можно оценить степень преобразования магнитной энергии, запасенной в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД, в механическую работу  $A$  с помощью известного критерия – магнитного КПД  $\eta_m$  [99; 111]:

$$\eta_m = \frac{A}{A + W_{м.о}},$$

где  $W_{м.о}$  – энергия магнитного поля, оставшаяся в магнитной системе двигателя к концу рабочего хода.

Тогда выражение (5.1) примет более общий вид:

$$A_k = A_y = \eta_m \cdot (A_{и} - A_{п}), \quad (5.5)$$

в котором магнитный КПД  $\eta_m$  соответствует определенному энергетическому режиму от 1 до 7. Этот режим (или несколько режимов) определяется на стадии предварительного расчета при проектировании. Следовательно, необходимо установить зависимость между магнитным КПД и коэффициентом восстановления магнитной энергии  $k_B$ , который, как показано в главе 4, однозначно характеризует каждый из рассмотренных энергетических режимов.

Для этого достаточно оценить значение  $\eta_m$  для режимов с фиксированными значениями коэффициента восстановления  $k_B$  (Таблица 4.1). На рисунке 5.4 по выражениям (5.2) – (5.4) представлены семейства зависимостей магнитного КПД от коэффициента восстановления для фиксированных значений кратности изменения индуктивности в диапазоне от 3 до 11, характерном для одно- и двух-зазорных конструкций магнитной системы импульсных ЛЭМД.

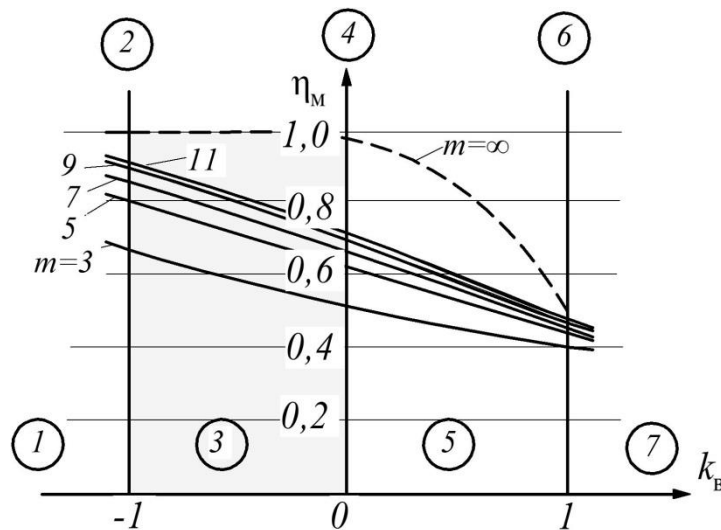


Рисунок 5.4 – Влияние коэффициента восстановления магнитной энергии на магнитный КПД при фиксированных значениях кратности индуктивности

Магнитный КПД растет (Рисунок 5.4) практически линейно с уменьшением  $k_B$  от 1 (режим 6) до 0 (режим 4) и далее до  $-1$  (режим 2). При малых кратностях  $m = 3...4$  интенсивность роста  $\eta_m$  слабее, нежели для кратностей  $m = 9...11$ . Причем при малых кратностях  $m$  кривая  $\eta_m$  слабо вогнута, а при больших кратностях  $m$  – слабо выпукла. На этом же рисунке пунктиром показана кривая предельного магнитного КПД при стремлении  $m$  к бесконечности, а

наиболее энергоэффективные режимы (2...4) выделены заливкой. Энергетический режим 1 хотя и имеет высокий  $\eta_m$ , но для него, как показано в главе 4, характерно неполное преобразование магнитной энергии в механическую работу, что делает этот режим неэффективным.

Взаимные соотношения (5.5) удобно использовать на этапе проектного расчета электромагнитных приводов для ориентировочного нахождения энергии удара, динамического тягового усилия, а при решении дифференциального уравнения движения – частоты ходов якоря и ударной мощности.

На этапе проектного расчета энергетический режим импульсного ЛЭМД зачастую неизвестен. В этом случае целесообразно принять значение магнитного КПД равным 0,5, что обеспечивает некоторый запас в определении энергии удара. Следовательно, предложенные ранее методики расчета импульсных электромагнитных приводов по заданной энергии рабочего хода [135; 146-149], в которых  $\eta_m = 0,5$ , вполне оправданы.

На основе взаимных соотношений для электромеханических систем получено обобщенное выражение для определения энергии рабочего хода (энергии удара), которое можно использовать для детального анализа и сравнения энергетических и динамических характеристик различных конструктивных схем электромагнитных машин.

## **5.2 Взаимные соотношения в мощных импульсных электромагнитных машинах**

Полученные в предыдущем разделе взаимные соотношения для электромеханических систем применим для предварительного расчета мощных многосекционных импульсных электромагнитных машин. Это могут быть молоты, пресс-молоты, прессы (Рисунок 5.5) [9; 12; 15; 19; 49; 144; 150].

Будем считать, что машина расположена вертикально и каждая секция создает одинаковое статическое тяговое усилие  $F_{ст}$  на перемещении  $\delta$ . Рассмотрим период холостого хода машины, при котором якорь массой  $m_a$  поднимается возбужденными секциями.



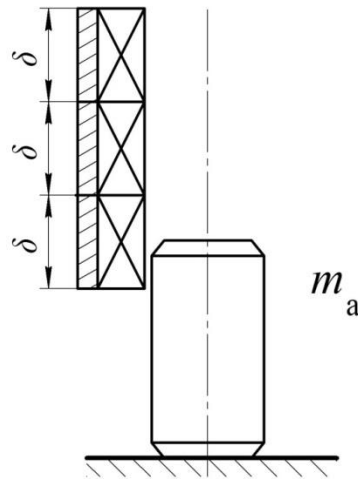


Рисунок 5.5 – Многосекционная машина ударного действия

Кинетическая энергия  $A_{к.1}$ , приобретенная якорем после разгона первой секцией может быть определена по формуле (5.5). В ней на этапе проектного расчета коэффициент  $\eta_m$  (магнитный КПД) может быть принят равным 0,5 из-за невозможности определения энергетического режима. К тому же мощные электромагнитные машины обычно работают в режимах близких к режиму 6 ( $I = \text{const}$ ). Тогда получим [146; 148]:

$$A_{к.1} = 0,5(A_{и} - m_a g \delta) = m_a g \delta (0,5 F_{ст*} - 0,5), \quad (5.6)$$

где  $A_{и} = F_{ст} \cdot \delta$  – интегральная работа;  $F_{ст*} = F_{ст}/m_a \cdot g$  – относительное статическое тяговое усилие импульсного ЛЭМД;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

После разгона второй секцией якорь обретает кинетическую энергию:

$$A_{к.2} = 0,5(A_{и} + A_{к.1} - m_a g \delta) = m_a g \delta \left( \frac{3}{4} F_{ст*} - \frac{3}{4} \right). \quad (5.7)$$

После разгона третьей секцией будет:

$$A_{к.3} = \frac{0,5(A_{и} + A_{к.2} - m_a g \delta)}{2} = m_a g \delta \left( \frac{7}{8} F_{ст*} - \frac{7}{8} \right). \quad (5.8)$$

Обобщив выражения (5.7) и (5.8), найдем кинетическую энергию якоря после разгона его  $q$  секциями:

$$A_{к.q} = 0,5(A_{и} + A_{к.(q-1)} - m_a g \delta) = m_a g \delta \left( 1 - \frac{1}{2^q} \right) (F_{ст*} - 1). \quad (5.9)$$

В этом случае якорь запасает потенциальную энергию

$$A_{\text{пот}} = n \cdot m_a g \delta + A_{\text{к.}q}. \quad (5.10)$$

При работе рассматриваемой машины в режиме молота простого действия энергия удара  $A_{\text{у.}q}$  его с учетом (5.9):

$$A_{\text{у.}q} = A_{\text{пот}} = m_a g \delta \left[ q + \left(1 - \frac{1}{2^q}\right)(F_{\text{ст}} * -1) \right]. \quad (5.11)$$

Для определения динамических сил тяги  $q$ -секционной машины, используем выражение динамической силы  $F_{\text{д.}1}$  для первой секции:

$$F_{\text{д.}1} = 0,5(F_{\text{ст}} + m_a g). \quad (5.12)$$

Для второй секции выражение кинетической энергии якоря равно:

$$A_{\text{к.}2} = (F_{\text{д.}2} - m_a g) \delta. \quad (5.13)$$

Приравнявая (5.7) и (5.13), найдем:

$$F_{\text{д.}2} = \frac{3}{4} F_{\text{ст}} + \frac{1}{2} m_a g. \quad (5.14)$$

Записав аналогично (5.13) выражение кинетической энергии  $A_{\text{к.}3}$  для третьей секции, найдем динамическую силу  $F_{\text{д.}3}$ :

$$F_{\text{д.}3} = \frac{7}{8} F_{\text{ст}} + \frac{1}{8} m_a g. \quad (5.15)$$

Обобщая выражение (5.12), (5.14) и (5.15), определим формулу для динамической силы  $F_{\text{д.}q}$  рассматриваемой машины [148]

$$F_{\text{д.}q} = \left(1 - \frac{1}{2^q}\right) F_{\text{ст}} + \frac{1}{2} \cdot q \cdot m_a g. \quad (5.16)$$

Оценим в уравнении (5.10) ту составляющую потенциальной энергии, которая определяет кинетическую энергию  $A_{\text{к.}q}$ , обеспечивающую выбег якоря вверх после отключения последней секции. Для этого рассмотрим отношение выражений (5.9) и (5.11) в виде [148]:

$$\frac{A_{\text{к.}q}}{A_{\text{у.}q}} = 1 / \left( 1 + \frac{q \cdot 2^q}{(2^q - 1)(F_{\text{ст}} * -1)} \right). \quad (5.17)$$

На рисунке 5.6 показаны зависимости, построенные по выражению (5.17).

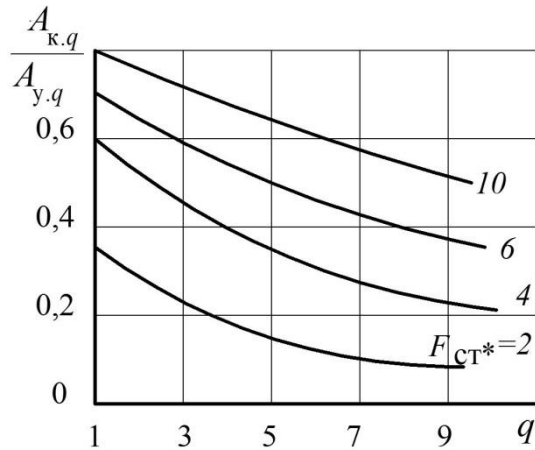


Рисунок 5.6 – Зависимости доли кинетической энергии в энергии удара от числа секций  $q$  при различных значениях статического тягового усилия двигателя

Из анализа их следует, что с ростом числа секций  $q$  доля кинетической энергии в энергии удара якоря падает, а с ростом относительной статической силы  $F_{ст*}$  — возрастает.

Представим выражение (5.11) и (5.16) в относительной форме:

$$A_{у.у.*} = \frac{A_{у.у.}}{m_a g \cdot \delta} = q + \left(1 - \frac{1}{2q}\right)(F_{ст*} - 1), \quad (5.18)$$

$$F_{д.у.*} = \frac{F_{д.у.}}{m_a g} = \left(1 - \frac{1}{2q}\right)F_{ст*} + \frac{1}{2q}. \quad (5.19)$$

Зависимости, построенные по выражению (5.18), показывают рост энергии удара с ростом числа секций и относительной статической силы (Рисунок 5.7).

Рассмотрим работу многосекционной машины в режиме молота двойного действия. Режим холостого хода такого молота аналогичен холостому ходу молота простого действия. Рабочий ход молота начинается с движения якоря, находящегося в верхнем положении под действием сил гравитации. К моменту действия на якорь тягового усилия первой по ходу секции, он приобретет начальную скорость  $V_0$  и кинетическую энергию  $0,5m_a V_0^2$ .

Применив выражение (5.1), определим кинетическую энергию якоря после

прохождения им первой секции

$$A_{к.1} = 0,5(A_{и} + \frac{m_a V_0^2}{2} + m_a g \cdot \delta) = m_a g \cdot \delta \cdot \left( \frac{F_{ст*}}{2} + \frac{1}{2} V_{0*}^2 + \frac{1}{2} \right), \quad (5.20)$$

где  $V_{0*}^2 = V_0^2 / V_B^2$ ,  $V_B = \sqrt{2g\delta}$  – базисная скорость якоря в конце свободного падения его с высоты  $\delta$ , равной длине секции.

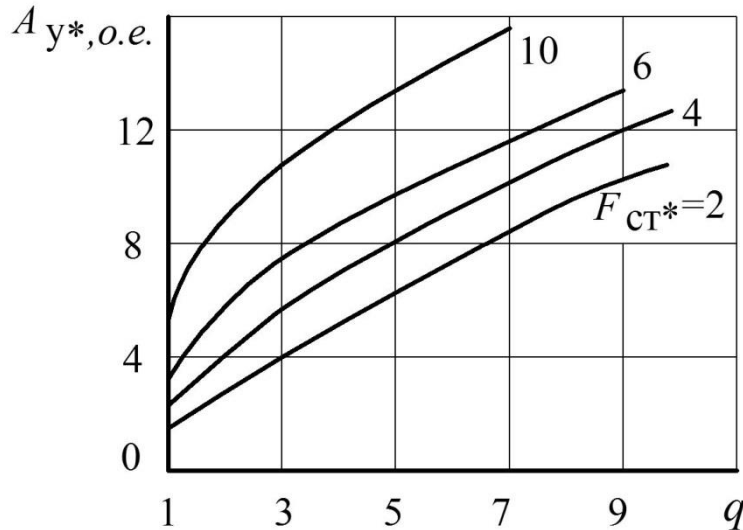


Рисунок 5.7 – Зависимость относительной энергии удара от относительной силы тяги и числа секций  $q$  молота простого действия

Выражение для кинетической энергии якоря после прохождения им второй и третьей секции, определенные аналогично (5.20), примут вид:

$$A_{к.2} = 0,5(A_{и} + A_{к.1} + m_a g \delta) = m_a g \delta \left( \frac{3}{4} F_{ст*} + \frac{1}{4} V_{0*}^2 + \frac{3}{4} \right), \quad (5.21)$$

$$A_{к.3} = 0,5(A_{и} + A_{к.2} + m_a g \delta) = m_a g \delta \left( \frac{7}{8} F_{ст*} + \frac{1}{8} V_{0*}^2 + \frac{7}{8} \right). \quad (5.22)$$

Обобщив выражения (5.21), (5.22), запишем формулу для кинетической энергии якоря, ускоренной  $q$  секциями машин [146; 148]:

$$A_{к.q} = m_a g \delta \left[ \left( 1 - \frac{1}{2^q} \right) F_{ст*} + \left( 1 - \frac{1}{2^q} \right) + \frac{V_{0*}^2}{2^q} \right]. \quad (5.23)$$

Эта же энергия является энергией удара для многосекционного молота двойного действия при условии удара якоря по ограничителю, установленному

непосредственно на выходе  $q$ -той секции, то есть  $A_{к. q} = A_{у. q}$ .

Представим выражение (5.23) в относительной форме:

$$A_{у. q}^* = \frac{A_{у. q}}{m_a g \cdot \delta} = \left(1 - \frac{1}{2^q}\right)(F_{ст*} + 1) + \frac{V_{0*}^2}{2^q}. \quad (5.24)$$

Выразим квадрат начальной скорости  $V_{0*}^2$  из условия равенства кинетических энергий, определяемых выражением (5.9) и  $m_a V_0^2 / 2$ :

$$V_{0*}^2 = \left(1 - \frac{1}{2^q}\right)(F_{ст*} - 1). \quad (5.25)$$

С учетом (5.25) выражение (5.24) примет вид:

$$A_{у. q}^* = \left(1 - \frac{1}{2^q}\right)(F_{ст*} + 1 + \frac{F_{ст*} - 1}{2^q}). \quad (5.26)$$

Формула (5.26) справедлива при одинаковом числе секций, участвующих в периоды холостого и рабочего хода машины. Из зависимостей, построенных по выражению (5.26) (Рисунок 5.8), следует, что энергия удара машины значительно растет при увеличении относительной силы тяги  $F_{ст*}$ .

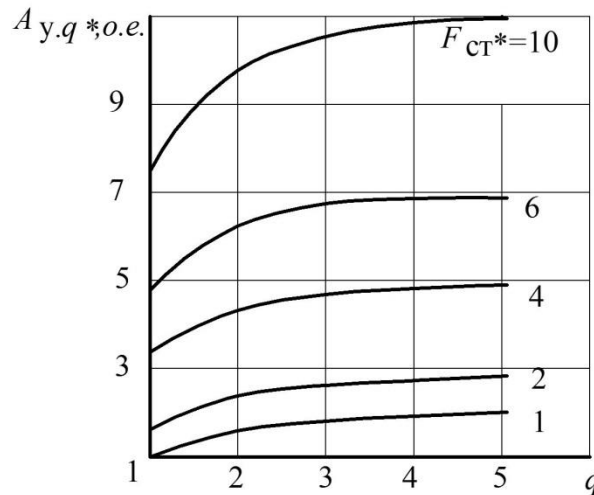


Рисунок 5.8 – Зависимость относительной энергии удара от числа секций  $q$  при различных значениях статического тягового усилия молота двойного действия

С ростом числа секций  $q$  энергия удара растет, однако при  $q > 3$  темп роста замедляется, что свидетельствует о наличии торможения.

Из формулы (5.1) можно определить кинетическую энергию якоря в конце рабочего хода для многосекционной машины при условии, что ускорение якоря первой секцией осуществляется с нулевой начальной скоростью. Эту же кинетическую энергию можно также определить из (5.24), отбросив последнее слагаемое:

$$A_{y.q*} = (1 - \frac{1}{2q})(F_{ст*} + 1). \quad (5.27)$$

Такую энергию удара будет иметь многосекционный молот двойного действия без выбега.

Оценим в период рабочего хода вклад секций в энергию удара машины. Для этого выразим энергию  $A_{рх.q*}$ , обусловленную секциями рабочего хода, как разность энергий удара машины  $A_{y.q*}$  и потенциальной  $A_{пот.q*}$ , причем  $A_{пот.q*} = A_{пот.q} / m_a g \cdot \delta = q$ . Тогда с учетом (5.27) получим

$$A_{рх.q*} = \frac{A_{рх.q}}{m_a g \cdot \delta} = A_{y.q*} - A_{пот.q*} = (1 - \frac{1}{2q})(F_{ст*} + 1) - q. \quad (5.28)$$

На рисунке 5.9 приведены зависимости, построенные по выражению (5.28). Отрицательные значения кинетической энергии  $A_{рх*}$  свидетельствуют о наличии в системе тормозных сил, превышающих движущие. Это проявляется тем сильнее, чем меньше  $F_{ст*}$  и больше число секции  $q$ .

Из рисунка 5.9 можно определить предельные для двигательного режима машины значения  $q$  и  $F_{ст*}$ , при которых  $A_{рх.q*} = 0$ . Выражение (5.28) и графики (Рисунок 5.9) позволяют определить оптимальное число секций машины, которые при заданных значениях  $F_{ст*}$  обеспечивают максимальный уровень кинетической энергии, то есть решать задачу синтеза.

Из уравнения (5.28) определим значение усилия  $F_{ст*}$  и числа секций  $q$ , при которых  $A_{рх.q*} = 0$ . Для чего решим это уравнение относительно  $F_{ст.q*}$  при  $A_{рх.q} = 0$ :

$$F_{\text{ст.}q*} = \frac{q}{1 - 1/2^q} - 1. \quad (5.29)$$

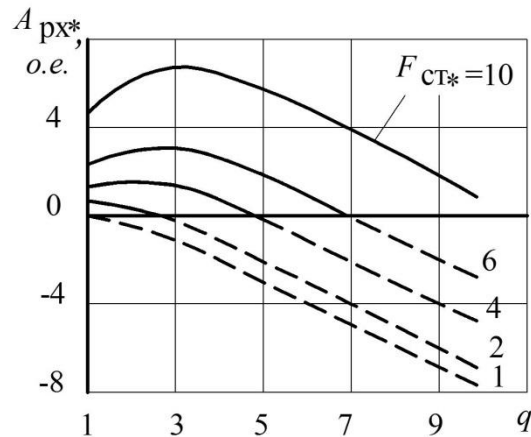


Рисунок 5.9 – Влияние числа секций  $q$  и статического тягового усилия на энергию рабочего хода

Полученное выражение определяет минимальное значение относительной силы тяги  $F_{\text{ст}*}$  каждой секции, при которой отсутствует рекуперативное генераторное торможение. Зависимость, построенная по выражению (5.29), разделяет два энергетических режима, двигательный (заштрихованная область) и генераторный (Рисунок 5.10).

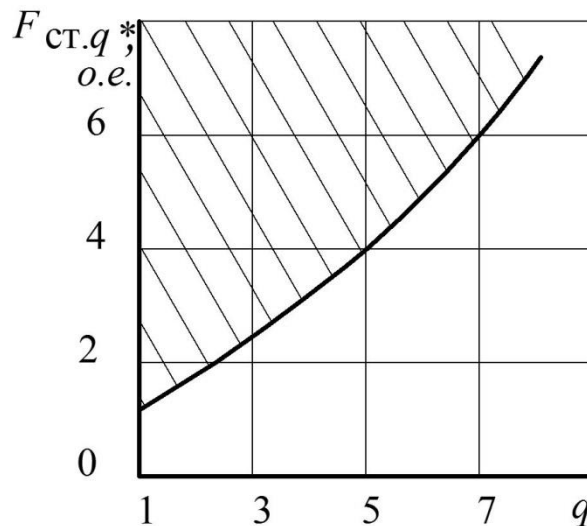


Рисунок 5.10 – Граница и область (заштрихована) статического тягового усилия, обеспечивающего двигательный режим, и числа секций  $q$  многосекционной ударной машины двойного действия без выбега

Из рисунка 5.10 следует, что с ростом числа секций машины для работы её

в двигательном режиме необходимо увеличивать силу  $F_{СТ*}$ .

В результате проведенных исследований получены расчетные выражения для динамических и энергетических характеристик многосекционных линейных импульсных электромагнитных машин в различных режимах, в том числе и генераторных, снижающих их эффективность.

Таким образом, установленное выше явление снижения энергии удара вследствие появления генераторного режима необходимо учитывать при проектировании мощных электромагнитных машин с энергией удара свыше 1 кДж. В то же время для электромагнитных машин малой и средней мощности с энергией удара до 100...400 Дж явление снижения энергии удара не актуально. Это объясняется различием в величине статического тягового усилия рабочего хода этих машин. Так, для мощных электромагнитных двухобмоточных молотов значение относительного тягового усилия рабочей обмотки составляют обычно  $F_{СТ*}=2...4$  о.е., тогда как для электромагнитных прессов и пресс-молотов –  $F_{СТ*}=10...20$  о.е. Поэтому генераторный режим для последних практически невозможен, а снижение энергии удара составляет единицы процентов, что несущественно.

### **5.3 О вводе сторонней механической энергии в импульсный линейный электромеханический преобразователь**

Взаимодействие сторонней механической энергии с энергиями ЭМП электромагнитного типа относится к специальным режимам его работы [114]. Конструктивная схема ЭМП (Рисунок 5.11) представляет собой однообмоточный электромагнит с подвижным якорем.

К источникам сторонней механической энергии относятся:

1 - потенциальная энергия буферного устройства, например, в ручном электроинструменте (электромагнитные молотки и перфораторы) [5; 6; 15];

2 – механическая энергия возврата якоря в период холостого хода, обеспе-



чиваемая возвратной пружиной, обмоткой холостого хода (в молотах), второй обмоткой (в молотках и перфораторах), выбегом бойка (якоря) в однообмоточных молотах двойного действия, в молотах со свободным выбегом в режимах одиночных и непрерывных ходов [5; 6; 15];

3 – механическая (кинетическая) энергия, создаваемая отдельными секциями обмоток, или двигателями другой, неэлектрической природы;

4 – кинетическая энергия отскока от обрабатываемой среды;

5 – известен режим, когда ЭМП работает силовым двигателем на упор, компенсируя силовую нагрузку от другого устройства. Это так называемые силовые компенсаторы. Иногда они выступают в роли виброкомпенсаторов, виброизоляторов, работая в противофазе с внешним вибровозбудителем, обеспечивая спокойное состояние фундаментов зданий, столов крупных станков и т.д.

6 – работа ЭМП в режиме генератора электрических импульсов, когда ферромагнитный якорь перемещается внутри возбужденной обмотки ЭМП.

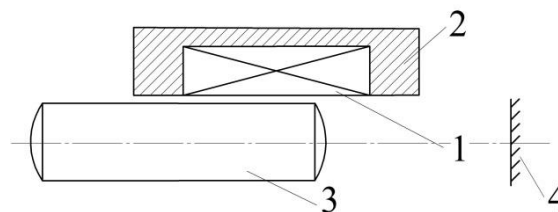


Рисунок 5.11 – Конструктивная схема электромеханического преобразователя:

1 – обмотка возбуждения; 2 – магнитопровод статора; 3 – якорь;

4 – обрабатываемая среда

Перечисленные выше виды потоков механической энергии в зависимости от конструктивной схемы импульсного ЭМП вводятся в его электромеханическую систему либо на этапе его рабочего хода, либо на этапе холостого хода. При известной массе якоря  $m_a$  сторонняя механическая энергия на этих этапах может быть охарактеризована определенной конечной скоростью  $V_0$  якоря и его начальной (первичной) кинетической энергией согласно (5.5)  $A_{к1} = \eta_m \cdot (A_n - A_n) = 0,5 m_a \cdot (V_0)^2$ , а по отношению к электромеханической системе скорость  $V_0$  одновременно является и начальной скоростью. Так как на этапе проектирова-

ния энергетический режим работы ЭМП не известен, то коэффициент  $\eta_m$  в выражении  $A_{к1}$  принимаем равным 0,5, исходя из взаимных соотношений (п. 5.1) для электромеханических преобразователей электромагнитного типа.

При исследовании рабочих процессов необходимо учитывать знак вводимой механической энергии, который зависит от совпадения или несовпадения скорости  $V_0$  и статического тягового усилия  $F_{ст}$  импульсного ЭМП на конкретном этапе. В случае их совпадения импульсный ЭМП может работать в режиме двигателя или генератора, а при несовпадении – в режиме электромагнитного тормоза.

Оценим влияние вводимой на этапе рабочего хода сторонней механической энергии на рабочие процессы импульсного ЭМП, выполненного, например, по конструктивной схеме однообмоточного молота двойного действия (Рисунок 5.12). Будем считать, что такой преобразователь имеет статические тяговые характеристики, неизменные на большей части перемещения якоря, электромагнитное усилие возникает после включения обмотки возбуждения преобразователя без запаздывания, продольная ось молота расположена вертикально, а скорость  $V_0$  якоря и статическое тяговое усилие  $F_{ст}$  на этапе рабочего хода совпадают и направлены вниз.

Получим выражение энергии удара  $A_y$  импульсного ЭМП в составе однообмоточного молота двойного действия. Рабочий цикл такой электромагнитной машины начинается с этапа холостого хода и заканчивается рабочим ходом. С подачей напряжения в обмотку возбуждения начинается подъем якоря массой  $m_a$  на высоту  $\delta_n$  (холостой ход), в результате чего якорем запасается потенциальная энергия  $m_a \cdot g \cdot \delta_n$ . При этом часть пути  $\delta$  якорь в течение холостого хода проходит сначала под действием электромагнитного усилия (активный участок), а затем часть пути  $\delta_1$  – по инерции (на выбеге), при отключенном питании обмотки возбуждения. При движении якоря вниз (рабочий ход) он перемещается сначала только под действием силы тяжести (пассивный участок длиной  $\delta_1$ ), а далее, на активном участке, – под действием одновременно электромагнитного усилия и силы тяжести, проходя путь  $\delta$ . Следовательно,  $\delta_n = \delta_1 + \delta$  – полный путь, прой-

денный якорем как в период холостого, так и рабочего ходов.

Для упрощения нахождения энергии удара  $A_y$  как кинетической энергии якоря целесообразно воспользоваться взаимными соотношениями (5.1) для электромеханической системы, справедливыми для ненасыщенного магнитопровода импульсного ЭМП и без учета потерь от перемагничивания, вихревых токов и потерь на трение [120; 146; 148].

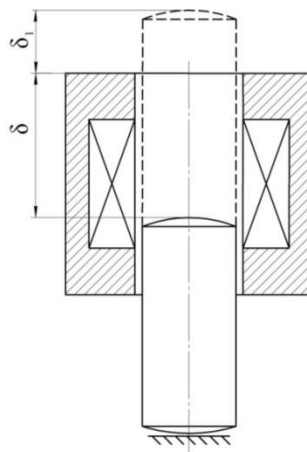


Рисунок 5.12 – Конструктивная схема однообмоточного молота двойного действия

В (5.1) интегральная работа  $A_{\text{и}}$  связана с особенностями электромеханического преобразователя и с его статическими тяговыми характеристиками  $F_{\text{ст}}(\delta)$ , а поскольку статическое тяговое усилие неизменно на большей части перемещения  $\delta$ , то  $A_{\text{и}} = F_{\text{ст}} \cdot \delta$ . Работа  $A_{\text{п}}$  связана с противодействующей характеристикой  $F_{\text{п}}(\delta)$  и особенностями конструктивной схемы электромагнитной машины.

Поскольку в энергию удара  $A_y$  молота двойного действия, совершаемого в период рабочего хода, входит и кинетическая энергия  $A_{\text{к1}}$ , запасенная якорем еще за период холостого хода и определяющая конечную скорость  $V_0$  на пассивном участке рабочего хода (она же является и начальной скоростью  $V_0$  на активном участке), то для периода холостого хода величину  $A_{\text{к1}}$  предварительно найдем с помощью выражения (5.1), справедливого для активного участка длиной  $\delta$ :

$$A_{\text{к1}} = 0,5 \cdot (F_{\text{ст}} \cdot \delta - m_a \cdot g \cdot \delta) = m_a \cdot g \cdot \delta \cdot 0,5 \cdot (F_{\text{ст}^*} - 1), \quad (5.30)$$

где  $F_{\text{ст}^*} = F_{\text{ст}} / (m_a \cdot g)$  – относительное статическое тяговое усилие;  $A_{\text{п}} = m_a \cdot g \cdot \delta$  –

работа, связанная с преодолением силы тяжести якоря на активном участке в период холостого хода, когда сила тяжести якоря и скорость движения якоря не совпадают по направлению;  $g$  – ускорение свободного падения.

Из (5.30) следует, что при тяговом усилии  $F_{ст*}=1$  кинетическая энергия якоря  $A_{кл}=0$  и выбег якоря отсутствует ( $\delta_1=0$ ).

Будем считать, что величина интегральной работы импульсного ЭМП при рабочем ходе останется такой же, как и при холостом ходе, что соответствует такому же статическому тяговому усилию  $F_{ст}$  на том же перемещении  $\delta$  активного участка. Применим выражение (5.1) для нахождения кинетической энергии якоря (энергии удара  $A_y$ ) на активном участке рабочего хода. После прохождения якорем пассивного участка пути  $\delta_1$  конечная скорость  $V_0$ , определяемая, как указано выше, величиной кинетической энергии  $A_{кл}$ , является одновременно начальной скоростью для активного участка пути  $\delta$ .

В отличие от холостого хода на рабочем ходе энергия  $A_{п}$  в выражении (5.1), связанная с противодействующими усилиями, включает в себя не только потенциальную энергию якоря  $m_a \cdot g \cdot \delta$  на активном участке, обусловленную силой тяжести якоря, но и вводимую в электромеханическую систему стороннюю кинетическую энергию  $A_{кл}$ , обусловленную начальной скоростью  $V_0$ , с которой якорь входит в обмотку. Причем эти обе энергии должны быть учтены с противоположным знаком:

$$A_{п} = - (m_a \cdot g \cdot \delta + A_{кл}). \quad (5.31)$$

Это объясняется тем, что сила тяжести  $m_a \cdot g$ , определяющая первое слагаемое, и начальная скорость  $V_0$ , определяющая второе слагаемое в правой части (5.31), направлены согласно с тяговым усилием ЭМП.

Тогда выражение энергии удара для рабочего хода примет вид:

$$A_y = 0,5 \cdot [F_{ст} \cdot \delta + (m_a \cdot g \cdot \delta + A_{кл})] = m_a \cdot g \cdot \delta \cdot (0,75 F_{ст*} + 0,25), \quad (5.32)$$

которое представим в относительной форме, приняв за базу потенциальную энергию якоря  $m_a \cdot g \cdot \delta$ :

$$A_{y*} = A_y / (m_a \cdot g \cdot \delta) = 0,75 F_{ст*} + 0,25. \quad (5.33)$$

Для дальнейшего исследования выразим в энергии удара молота (5.33) со-

ставляющие, обусловленные холостым ( $A_{xx}$ ) и рабочим ( $A_{px}$ ) ходами якоря, учтя (5.31) и имея ввиду, что  $A_y = A_{xx} + A_{px}$ :

$$A_{xx}^* = 1 + 0,5 \cdot (F_{ст}^* - 1) = 0,5 F_{ст}^* + 0,5; \quad (5.34)$$

$$A_{px}^* = 0,25 F_{ст}^* - 0,25. \quad (5.35)$$

На рисунке 5.13 представлены зависимости энергий  $A_y^*$ ,  $A_{xx}^*$ ,  $A_{px}^*$  от величины статического тягового усилия ЭМП, построенные по выражениям (5.33) – (5.35). Из их анализа следует, что все они линейно растут с увеличением  $F_{ст}$ , однако темп роста зависимости  $A_{xx}^*$  выше, нежели чем у  $A_{px}^*$ .

Для количественной оценки вклада этих составляющих в величину энергии удара (Рисунок 5.13) дополнительно представлены зависимости  $A_{xx}/A_y = f(F_{ст}^*)$  и  $A_{px}/A_y = f(F_{ст}^*)$ , первая из которых падает с ростом статического тягового усилия, а вторая – возрастает. При одинаковых значениях  $F_{ст}^*$  больший (не менее двукратного) вклад в энергию удара обеспечивается за счет холостого, нежели рабочего хода. Это обстоятельство предопределяет и бóльшую токовую, следовательно и тепловую, нагрузку обмотки в период холостого хода и соответственно меньшую токовую нагрузку в период рабочего хода машины. Поэтому для более полного использования активных материалов импульсного ЭМП необходимо в период рабочего хода использовать, например, форсированное питание обмотки возбуждения.

Для периода рабочего хода к моменту действия на якорь электромагнитного тягового усилия якорь приобретет начальную скорость  $V_0$  и стороннюю по отношению к обмотке кинетическую энергию  $A_{стор}$ :

$$A_{стор} = A_{к1} = 0,5 \cdot m_a \cdot V_0^2, \quad (5.36)$$

которую представим в относительной форме:

$$A_{стор}^* = A_{стор} / (m_a \cdot g \cdot \delta) = V_0^{*2}. \quad (5.37)$$

Используя выражение (5.30) и учитывая (5.31), представим энергию удара в виде:

$$A_y = 0,5 \cdot m_a \cdot g \cdot \delta \cdot (F_{ст}^* + V_0^{*2} + 1), \quad (5.38)$$

где  $V_0^* = V_0/V_B$  – относительная начальная скорость якоря при входе его в обмот-

ку;  $V_B = \sqrt{2g \cdot \delta}$  – базисная скорость якоря в конце его свободного падения с высоты  $\delta$ . Выражение (5.38) представим в относительной форме:

$$A_{y*} = 0,5 \cdot (F_{ст*} + V_0^{*2} + 1) = 0,5 \cdot (F_{ст*} + A_{стор*} + 1). \quad (5.39)$$

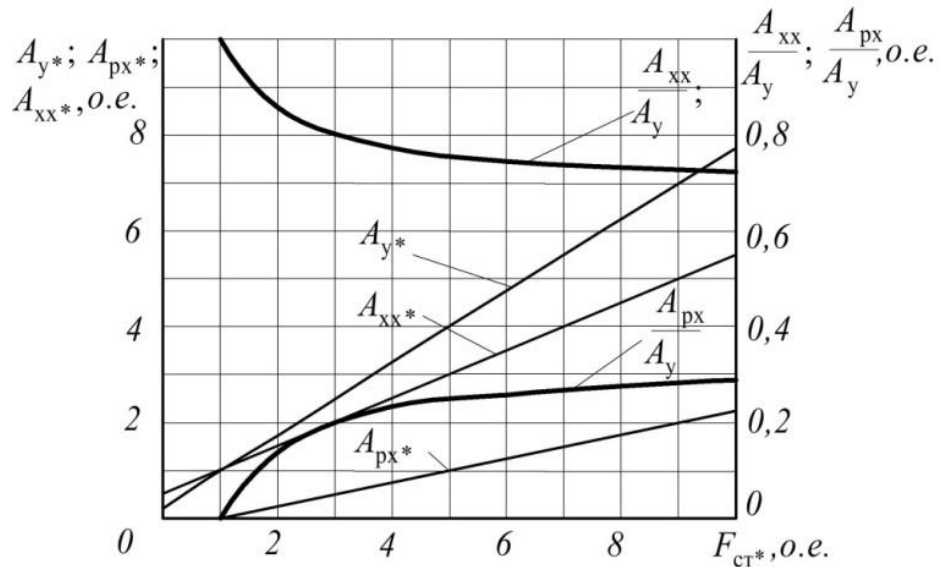


Рисунок 5.13 – Влияние статического тягового усилия на энергетические характеристики молота двойного действия

Из рисунка 5.14, на котором представлены характеристики, построенные по выражению (5.39) при  $F_{ст*} = \text{const}$ , следует, что энергия удара молота растет, как с увеличением тягового усилия  $F_{ст*}$ , так и начальной скорости  $V_0^*$ , то есть сторонней механической энергии  $A_{стор}$ , вводимой в импульсный ЭМП.

На этом же рисунке штрихпунктирной линией изображена следующая предельная относительная энергия:

$$A_{у.пред*} = (V_0^{*2} + 1) = (A_{стор*} + 1), \quad (5.40)$$

определяемая суммой сторонней кинетической и потенциальной энергиями якоря. Точки пересечения кривых  $A_{y*}$ , построенных по (5.39), с кривой, построенной по (5.40), определяют значения предельно допустимых скоростей  $V_{0пред*}$  якоря для каждого значения  $F_{ст*}$ .

В диапазоне изменений начальной скорости якоря  $V_0^*$  от нуля до  $V_{0пред*}$  энергия удара молота двойного действия будет больше суммы сторонней кинетической и потенциальной энергий якоря.

тической  $A_{\text{стор}}$  и потенциальной  $m_a \cdot g \cdot \delta$  энергий якоря (Рисунок 5.14), что свидетельствует о работе импульсного ЭМП в двигательном режиме (сплошные линии). Если  $V_0$  будет больше  $V_{0\text{пред}}$ , то возникает генераторный эффект, при котором накопленная в рабочих зазорах магнитная энергия лишь частично преобразуется в механическую энергию, а другая часть магнитной энергии возвращается в источник (пунктирные линии). Это так называемый «совмещенный режим» [114].

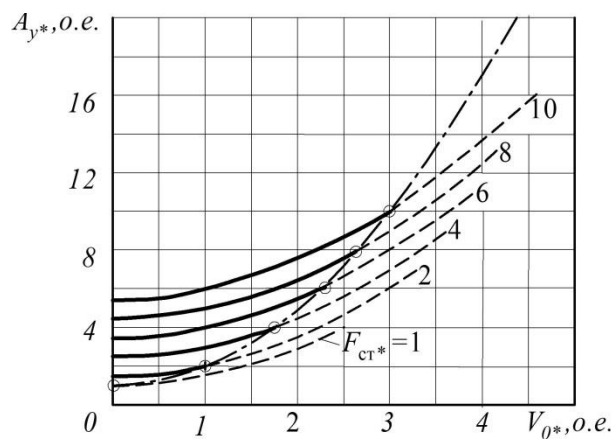


Рисунок 5.14 – Влияние начальной скорости на энергию удара молота для различных значений тягового усилия

Условие (5.40) можно рассматривать как ограничение при выборе обобщённых режимных параметров ударной машины, а именно: сочетание параметров  $F_{ст*}$ ,  $V_{0*}$  и  $A_{y*}$ , которое соответствует нахождению их правее штрихпунктирной линии (Рисунок 5.14), является недопустимым, поскольку в этой области возникает генераторный эффект, снижающий энергию удара молота и его эффективность. Определим минимально необходимое статическое тяговое  $F_{ст.мин*}$ , исключаяющее генераторный эффект, при заданной начальной скорости якоря  $V_{0*}$  из выражения (5.39), подставив величину  $(V_{0*}^2 + 1)$  в его левую часть, получим:

$$F_{ст.мин*} \geq (V_{0*}^2 + 1), \quad (5.41)$$

а также предельную стороннюю механическую энергию, вводимую в импульсный ЭМП (Рисунок 5.15) при заданном усилии  $F_{ст*}$ , из (5.41) и (5.37):

$$A_{стор.пред*} = F_{ст*} - 1. \quad (5.42)$$

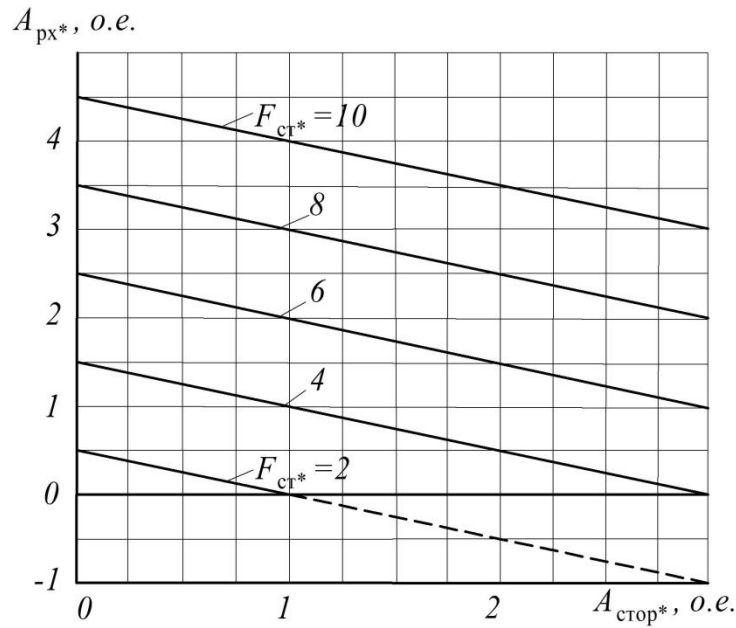


Рисунок 5.15 – Влияние сторонней механической энергии на энергию рабочего хода для различных значений тягового усилия

Для количественной оценки влияния сторонней механической энергии на энергию удара молота двойного действия определим энергию рабочего хода, создаваемую обмоткой возбуждения импульсного ЭМП, в виде суммы  $A_y = A_{\text{рх}} + A_{\text{стор}} + m_a \cdot g \cdot \delta$ , откуда получим:

$$A_{\text{рх}^*} = A_{\text{рх}} / (m_a \cdot g \cdot \delta) = 0,5 \cdot (F_{\text{ст}^*} - A_{\text{стор}^*} - 1). \quad (5.43)$$

Кроме того, оценим вклад обмотки в период рабочего хода в создание энергии удара молота, полученное из (5.43) и (5.39):

$$\frac{A_{\text{рх}}}{A_y} = 1 - 2 / (1 + F_{\text{ст}^*} / (1 + A_{\text{стор}^*})). \quad (5.44)$$

На рисунке 5.16 представлены зависимости, построенные по (5.44) при условии  $F_{\text{ст}^*} = \text{const}$ , которые характеризуют эффективность обмотки при рабочем ходе молота. Они свидетельствуют о том, что вклад обмотки в создание энергии удара молота двойного действия с ростом начальной скорости  $V_0$  якоря, обусловленной сторонней механической энергией, уменьшается.

Положительные значения энергии обмотки при рабочем ходе свидетельствуют о работе импульсного ЭМП в двигательном режиме, когда обмотка ускоряет якорь, а отрицательные – о работе в совмещенном режиме [114], когда по-



является генераторный режим одновременно с двигательным, что является специфической особенностью двухступенчатого электромеханического преобразователя электромагнитного типа и нежелательно для рассматриваемой машины.

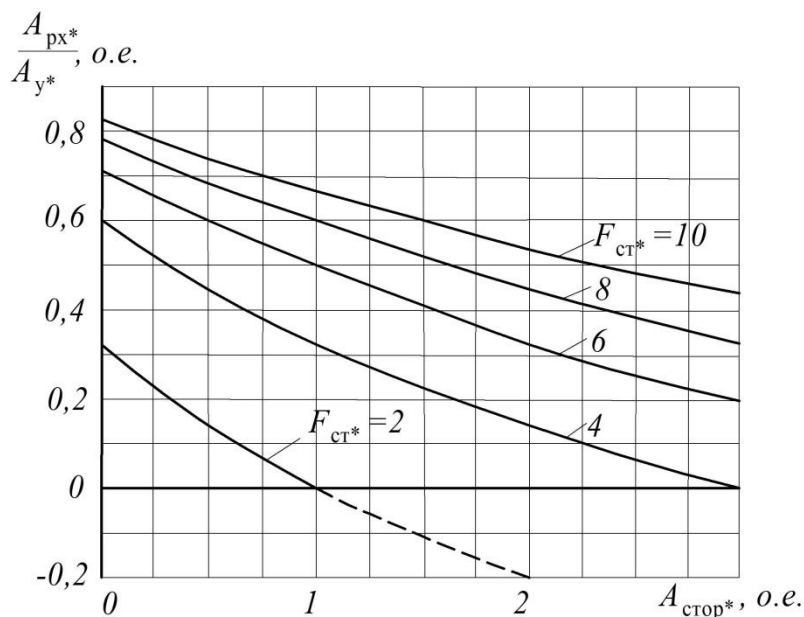


Рисунок 5.16 – Влияние сторонней механической энергии на относительный вклад обмотки в энергию удара при рабочем ходе для различных значений тягового усилия

Следовательно, для обеспечения работы импульсного ЭМП в двигательном режиме при наличии сторонней механической энергии, вводимой в электромеханическую систему, величина тягового усилия  $F_{ст*}$  должна быть значительно больше единицы. Это требует от устройства питания и управления в период рабочего хода возможности либо форсированного питания, либо иного способа питания обмотки, например, предложенного в [109; 121].

Установлено, что введение сторонней механической энергии в импульсный ЭМП электромагнитного типа при совпадении направлений скорости вводимой механической энергии с тяговым усилием преобразователя может снизить его эффективность вследствие генераторного эффекта. Логично предположить, что при несовпадении направлений скорости вводимой механической энергии с тяговым усилием преобразователя ожидается повышение его эффективности, а генераторный эффект в этом случае отсутствует [18; 121].

Для повышения эффективности импульсного ЭМП, работающего в режи-

ме молота двойного действия или при наличии обмоток рабочего хода, необходимо увеличивать статическое тяговое усилие импульсного ЭМП сверх установленного минимального значения  $F_{ст*} > 1$ , например, за счёт форсировки или за счёт предварительного аккумулирования магнитной энергии рабочих зазоров, например, в период холостого хода [18-20; 50; 81; 99; 100; 106; 108; 119].

Следует заметить, что установленное в данном и предыдущем параграфах явление снижения энергии удара вследствие появления генераторного режима необходимо учитывать при проектировании мощных электромагнитных машин с энергией удара свыше 1 кДж. В то же время для электромагнитных машин средней и малой мощности с энергией удара до 100...400 Дж явление снижения энергии удара не актуально. Это объясняется различием в величине статического тягового усилия рабочего хода этих машин. Так, для мощных электромагнитных двухобмоточных молотов значения  $F_{ст*} = 2...4$  о.е., тогда как для электромагнитных прессов и пресс-молотов –  $F_{ст*} = 10...20$  о.е. и более. Поэтому генераторный режим для последних практически невозможен, а снижение энергии удара составляет единицы процентов, что несущественно.

## **5.4 Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей**

### **5.4.1 Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных ЛЭМД с пружинным накопителем**

К настоящему времени накоплен опыт теоретических, экспериментальных и эксплуатационных исследований импульсных ЛЭМД в составе машин для импульсных технологий, свидетельствующий о многообразии конструктивных схем, которые отличаются способом реализации возвратно-поступательного движения якоря (бойка) [5; 9; 11; 15; 21; 90; 115; 117; 151-154]. Преобладающую роль в приводе импульсных линейных машин играют однообмоточные ЛЭМД. В работе [149] получены энергетические и динамические характеристики одной

из распространённых конструктивных схем однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной. В такой схеме рабочий ход совершается при участии электромагнитных сил обмотки, а холостой – с помощью возвратной пружины [106].

В составе машин для импульсных технологий также используется конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем энергии (Рисунок 5.17), обладающая рядом особенностей по сравнению со схемой с возвратной пружиной.

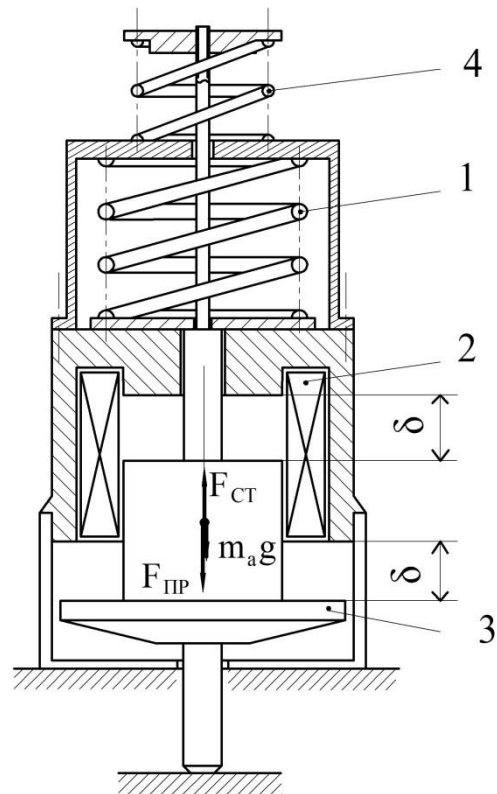


Рисунок 5.17 – Конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем: 1 – накопительная пружина; 2 – обмотка возбуждения; 3 – якорь; 4 – вспомогательная пружина

В этой конструкции холостой ход совершается при участии электромагнитных сил обмотки двигателя с одновременным запасанием потенциальной энергии в сжатой накопительной пружине 1. Рабочий ход машины происходит за счет накопленной энергии этой пружины, а также гравитации.

В работе [155] рассмотрены эти две конструктивные схемы однообмоточных ударных машин для погружения электродов в грунт и экспериментально получены их динамические характеристики, причём в этих схемах одна и та же

пружина использована как для совершения холостого хода в первой из них, так и для рабочего хода во второй. Полученные таким образом динамические характеристики рассмотренных схем позволили сравнить их между собой.

Однако экспериментальные динамические характеристики для рассмотренных схем получены при условии равенства конечных скоростей якоря как при рабочем, так и при холостом ходах. В этих случаях избыточная накопленная кинетическая энергия якоря при холостых ходах будет преобразовываться в шум и тепловые потери при работе двигателя, снижая его энергетические показатели и надёжность. В настоящей работе исследуется наиболее распространённый режим импульсного ЛЭМД, при котором конечные скорости якоря, в отличие от [155], существенно отличаются: при рабочих ходах они значительно выше, чем при холостых ходах.

Получим приближенным методом расчетные выражения энергетических и динамических характеристик однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем и на основе их анализа выявить возможности исследуемой конструктивной схемы. Будем считать, как и в [135; 149; 155], что двигатель расположен вертикально, начальная скорость движения его якоря равна нулю, при холостом ходе машины противодействующее якорю усилие накопительной пружины  $F_{\text{пр}}$  пропорционально его перемещению  $\delta$ , характеристики питающего импульса напряжения и пружины неизменны, имеется соответствие окончания и появления тока в обмотке моментам остановки якоря, совершающего рабочий или холостой ход. Кроме того, в обесточенном состоянии обмотки 2 и нижнем (исходном) положении якоря 3 его вес уравновешен вспомогательной пружиной 4 (Рисунок 5.17). С её помощью устанавливают исходное положение якоря с усилием начального поджатия  $F_0$  накопительной пружины, у которой жесткость  $c$  неизменна на всем перемещении якоря, массой пружин пренебрегаем.

Двигатели с такой конструктивной схемой используются в приводе машин прессового и штамповочного оборудования [9], ударных машин для погружения в грунт металлических электродов [18; 19; 155], в составе электромагнитного привода, например в вакуумных выключателях, отключение которых происхо-

дит за счёт потенциальной энергии, предварительно сжатой в период холостого хода накопительной пружины. При доработке этой конструктивной схемы накопительная пружина может работать как на сжатие, так и на растяжение, что обеспечит для привода, например, того же выключателя его безударный ход как на включение, так и на отключение.

Оценим энергетическую и динамическую эффективность рассмотренной конструктивной схемы, выразив кинетическую энергию якоря и его динамические характеристики. Для этого используем известное выражение (5.45) кинетической энергии якоря ЛЭМД, полученное с помощью принципа взаимности для электромеханических систем без учета потерь в магнитопроводе двигателя от перемагничивания и вихревых токов, а также потерь, связанных с преодолением сил трения [120; 135; 140-142; 146]. Такое приближенное выражение позволяет найти кинетическую энергию  $A_k$  якоря двигателя по его статическим характеристикам – интегральной работе  $A_{и}$  и работе  $A_{п}$ , связанной с противодействующим усилием по (5.1).

С целью упрощения примем значения статического тягового усилия  $F_{СТ}(\delta)$  двигателя не зависящими от перемещения  $\delta$ , тогда

$$A_{и} = \int_{\delta_{н}}^{\delta_{к}} F_{СТ}(\delta) d\delta = F_{СТ} \cdot (\delta_{н} - \delta_{к}) = F_{СТ} \cdot \delta, \quad (5.45)$$

где  $\delta_{н}$ ,  $\delta_{к}$  – начальный и конечный рабочие зазоры;  $\delta = \delta_{н} - \delta_{к}$ .

Учитывая, что работа  $A_{п}$ , связанная с противодействующим усилием, для данной конструктивной схемы может быть представлена в виде двух слагаемых как  $A_{п} = m_a \cdot g \cdot \delta + A_{пр}$ , запишем с учётом (5.1) для этапа холостого хода двигателя выражение кинетической энергии якоря  $A_k$ :

$$A_k = 0,5 \cdot (F_{СТ} \cdot \delta - m_a \cdot g \cdot \delta - A_{пр}), \quad (5.46)$$

$$A_{пр} = \int_{\delta_{н}}^{\delta_{к}} F_{пр}(\delta) d\delta = 0,5 \cdot c \cdot \delta^2 + F_0 \cdot \delta, \quad (5.47)$$

где  $m_a$  – масса якоря;  $A_{пр}$  – потенциальная энергия, запасаемая в накопительной пружине при ее деформации на величину перемещения  $\delta$  под действием элек-

ромагнитных сил обмотки ЛЭМД; второе слагаемое  $F_0 \cdot \delta$  в выражении (5.47) учитывает энергию, связанную с усилием начального поджатия этой пружины. Тогда (5.46) с учетом (5.47) представим в виде:

$$A_k = 0,5 \cdot m_a \cdot g \cdot \delta \cdot (F_{CT*} - 1 - 0,5 \cdot c_* - F_{0*}),$$

где  $F_{CT*} = F_{CT} / (m_a \cdot g)$  – относительное статическое тяговое усилие;  $F_{0*} = F_0 / (m_a \cdot g)$  – относительное усилие начального поджатия пружины;  $c_* = c \cdot \delta / (m_a \cdot g)$  – относительная жесткость накопительной пружины.

Для нахождения динамической (движущей) силы тяги  $F_d$  импульсного ЛЭМД на этапе холостого хода машины представим кинетическую энергию якоря (5.46) в виде алгебраической суммы двух слагаемых:

$$A_k = \int_{\delta_H}^{\delta_K} F_d(\delta) d\delta - (A_{пр} + m_a \cdot g \cdot \delta), \quad (5.48)$$

где первое слагаемое характеризует вклад обмотки ЛЭМД в создание кинетической энергии якоря на данном этапе, второе – уменьшение этой энергии и переход ее в потенциальные энергии пружины и положения якоря. Приравняв правые части (5.46) и (5.48), с учетом (5.47) получим в относительной форме интересующее нас выражение динамической силы тяги двигателя:

$$F_{d*} = F_d / (m_a \cdot g) = 0,5(F_{CT*} + 0,5 \cdot c_* + F_{0*} + 1). \quad (5.49)$$

Кинетическая энергия (энергия удара)  $A_y$  машины во время рабочего хода будет определяться потенциальными энергиями положения якоря и состояния пружины. При ограниченном перемещении  $\delta$  получим выражение энергии  $A_y = m_a \cdot g \cdot \delta + A_{пр}$ , которое с учетом (5.47) примет вид:

$$A_y = m_a \cdot g \cdot \delta \cdot (0,5 \cdot c_* + F_{0*} + 1)$$

или в относительной форме:

$$A_{y*} = A_y / (m_a \cdot g \cdot \delta) = 0,5 \cdot c_* + F_{0*} + 1. \quad (5.50)$$

Как видно из (5.50), при неизменном перемещении  $\delta$  энергия удара (кинетическая энергия) определяется жесткостью  $c$  пружины и усилием  $F_0$  ее начального поджатия, то есть только параметрами пружины [135].

Если принять, что для этапа холостого хода машины при полностью воз-

буждаемом и равном  $\delta$  перемещении якоря его кинетическая энергия  $A_k$ , определяющая выбег, должна к концу перемещения отсутствовать, то из (5.46) для  $A_k=0$  получим:  $F_{CT} \cdot \delta = m_a \cdot g \cdot \delta + A_{пр}$ , откуда с учетом (5.47) получаем соотношение, связывающее энергию удара, статическую силу тяги, массу подвижных частей, жесткость и усилие начального поджатия пружины при условии  $A_k=0$ , то есть при условии безударного холостого хода:

$$F_{CT} = m_a \cdot g + 0,5 \cdot c \cdot \delta + F_0$$

или в относительной форме:

$$F_{CT*} = 1 + 0,5 \cdot c_* + F_{0*}. \quad (5.51)$$

Из (5.51) следует, что каждому значению жесткости пружины, усилия ее начального поджатия и массы подвижных частей соответствует определенное значение статической силы тяги ЛЭМД, при котором выбег якоря отсутствует. Если это усилие  $F_{CT*} > 1 + 0,5 \cdot c_* + F_{0*}$ , то при ограниченном перемещении якоря избыток его кинетической энергии при холостом ходе машины будет преобразовываться в другие виды энергии, например в механическую при ударе якоря о детали конструкции ЛЭМД, и рассеиваться в тепло. Величина энергии удара при этом не изменится, однако КПД двигателя упадет, повысится шум и снизится надежность привода. Если  $F_{CT*} < 1 + 0,5 \cdot c_* + F_{0*}$ , то величина перемещения якоря станет меньше  $\delta$ , а полезная энергия (например, энергия удара) понизится. Кроме того, для некоторых приводов необходимо обеспечить заданное перемещение  $\delta$ , чтобы, например, взвести накопительную пружину. Для работоспособности исследуемой конструктивной схемы машины для импульсных технологий должно существовать соответствие между параметрами пружинного накопителя и статическим тяговым усилием импульсного ЛЭМД. Следовательно, регулировочные свойства такой конструктивной схемы ограничены верхним пределом, при котором полезная энергия будет неизменной.

Для исследуемой схемы (Рисунок 5.17) существуют области допустимых значений параметров в виде ограничений, для которых выполняется (5.51):

$$F_{0*} \geq 0; c_* \geq 1; F_{CT*} > 1. \quad (5.52)$$

На рисунке 5.18 представлены зависимости относительных энергии удара  $A_{y*}$  и статического тягового усилия  $F_{СТ*}$  ЛЭМД от жесткости пружины  $c_*$ , силы ее начального поджатия  $F_{0*}$ , полученные из выражений (5.50) и (5.51) и при условиях (5.52), причем минимальное значение конструктивного параметра  $c_* = 1$  обозначено кружочками.

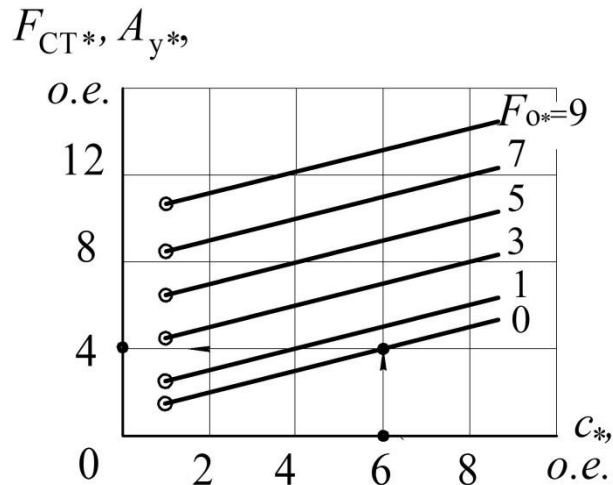


Рисунок 5.18 – Влияние жесткости возвратной пружины и усилия её начального поджатия на энергию удара и статическое тяговое усилие

Анализ этих зависимостей, имеющих линейный характер изменения, показывает, что с ростом жесткости пружины при неизменном значении силы начального поджатия необходимо повышать статическое тяговое усилие ЛЭМД, и энергия удара ЛЭМД также будет расти.

По зависимостям (Рисунок 5.18) или по (5.51) можно производить настройку конструктивной схемы: при заданных конструктивных параметрах  $c_*$  и  $F_{0*}$  легко определить необходимый режимный параметр  $F_{СТ*}$  двигателя, например, при  $c_* = 6$  и  $F_{0*} = 0$  получим  $F_{СТ*} = 4$ .

Динамические характеристики рассматриваемой машины будут определяться этапами рабочего и холостого ходов. Так как движение якоря происходит под действием падающей по перемещению силы, то на этапе холостого хода дифференциальное уравнение движения якоря ЛЭМД для рассматриваемой конструктивной схемы машины имеет следующий вид:



$$m_a \frac{d^2 \delta}{dt^2} = F_{\text{HX}} - c \cdot \delta, \quad (5.53)$$

где  $F_{\text{HX}}$  – начальное значение силы, движущей якорь (динамической силы) на этапе холостого хода, которое с учетом (5.49) и для  $\delta=0$  будет:

$$F_{\text{HX}} = F_{\text{д}} = 0,5 \cdot (F_{\text{СТ}} + F_0 + m_a \cdot g).$$

Время движения при холостом ходе  $t_{\text{ХХ}}$  найдено в [132]:

$$t_{\text{ХХ}} = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{F_{\text{КХ}}}{F_{\text{HX}}} \right), \quad (5.54)$$

где  $F_{\text{HX}}, F_{\text{КХ}}$  – начальное и конечное значения силы, движущей якорь при холостом ходе.

Решение уравнения движения для рассматриваемой схемы на этапе холостого хода от  $t=0$  до  $t=t_{\text{ХХ}}$  при отсутствии затухания получено в [134]:

$$\delta(t) = \frac{F_{\text{HX}}}{c} + \frac{F_{\text{HX}}}{c} \cdot \sin \left( \sqrt{\frac{c}{m_a}} \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) = \delta_{\text{пр}} + \delta_{\text{пр}} \cdot \sin \left( \sqrt{\frac{c}{m_a}} \cdot t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (5.55)$$

где  $\delta_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{HX}}}{c}$  – значение принужденной составляющей  $\delta(t)$  для уравнения (5.53);

$\sqrt{c/m_a}$  – собственная круговая частота колебаний якоря. Закон изменения скорости движения якоря найдём после дифференцирования (5.55):

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{F_{\text{HX}}}{c} \cdot \sqrt{\frac{c}{m_a}} \cdot \cos \left( \sqrt{\frac{c}{m_a}} \cdot t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (5.56)$$

По условию в конечной точке при  $t=t_{\text{ХХ}}$  скорость движения якоря должна быть равна нулю, следовательно, из (5.56) получим:

$$t_{\text{ХХ}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{m_a}{c}}. \quad (5.57)$$

Из (5.57) следует, что время движения якоря на этапе холостого хода в явном виде не зависит от статического тягового усилия  $F_{\text{СТ}}$  импульсного ЛЭМД, а определяется только массой якоря и жесткостью накопительной пружины, хотя сам холостой ход совершается под действием этой силы  $F_{\text{СТ}}$ . В действительности согласно уравнению (5.51), полученному для режима безударного холостого

хода машины, статическая сила тяги должна быть согласована со свойствами пружинного накопителя (параметры  $F_0$  и  $c$ ). Поэтому время  $t_{xx}$  может быть выражено двояко: либо через тяговое усилие  $F_{CT}$ , либо без него. То же относится и ко времени рабочего хода  $t_{px}$ , поскольку энергетически рабочий ход машины с рассматриваемой конструктивной схемой обусловлен предшествующим ему холостым ходом. Покажем это, представив, например, выражение (5.57) для  $t_{xx}$  с учетом (5.51) в относительной форме и приняв за базисную величину время  $T_1$  свободного падения якоря с высоты  $\delta$ :

$$T_1 = \sqrt{2\delta/g}.$$

Получим время холостого хода  $t_{xx}$ , выраженное через усилие  $F_{CT*}$ :

$$t_{xx*} = \frac{t_{xx}}{T_1} = \frac{\pi}{2\sqrt{F_{CT*} - F_{0*} - 1}}, \quad (5.58)$$

а затем через жесткость накопительной пружины  $c_*$ :

$$t_{xx*} = \frac{t_{xx}}{T_1} = \frac{\pi}{\sqrt{2 \cdot c_*}}.$$

Подставив (5.57) в (5.54), получим значение конечной силы тяги  $F_{кx} = -F_{нx}$ , означающее, что якорь первую половину пути движется ускоренно, вторую – замедленно. На этапе холостого хода происходит «зарядка» пружинного накопителя.

На этапе рабочего хода, когда обмотка возбуждения импульсного ЛЭМД обесточена, уравнение движения якоря для рассматриваемой конструктивной схемы машины будет иметь вид, аналогичный (5.53):

$$m_a \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = F_{нр} - c \cdot \delta,$$

где  $F_{нр} = c \cdot \delta + F_0 + m_a \cdot g$  – начальное значение движущей силы на этапе рабочего хода, обусловленное накопительной пружиной, усилием начального поджатия и гравитацией. Конечное значение движущей силы на этом этапе  $F_{кр}$  определяется силой тяжести якоря и усилием начального поджатия пружины, то есть

$F_{кр} = m_a \cdot g + F_0$ . Тогда с учетом конечного  $F_{кр}$  и начального  $F_{нр}$  усилий, а также условия (5.51) время движения якоря при рабочем ходе  $t_{рх}$  якоря также определим двумя способами из уравнения (5.54):

$$t_{рх} = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( 1 / \left( 1 + c_* / (F_{СТ*} - 0,5 \cdot c_*) \right) \right) \right); \quad (5.59)$$

$$t_{рх} = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( 1 / \left( 1 + c_* / (1 + F_{0*}) \right) \right) \right).$$

Представим выражения (5.59) для  $t_{рх}$  и время цикла двигателя  $t_{ц} = t_{хх} + t_{рх}$  в относительной форме соответственно:

$$t_{рх*} = \frac{t_{рх}}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot c_*}} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( 1 / \left( 1 + c_* / (F_{СТ*} - 0,5 \cdot c_*) \right) \right) \right); \quad (5.60)$$

$$t_{ц*} = \frac{t_{ц}}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot c_*}} \left( \frac{3\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{1 + c_* / (F_{СТ*} - 0,5 \cdot c_*)} \right). \quad (5.61)$$

На рисунке 5.19 приведены построенные по (5.58) и (5.60) зависимости относительных времен холостого и рабочего ходов рассматриваемой машины от относительных значений жесткости пружины накопителя и статического тягового усилия ЛЭМД при условии (5.51), учитывающем начальное поджатие пружины. Кривые  $t_{рх*}$  для заданных значений жесткости  $c_*$  со стороны меньших значений  $F_{СТ*}$  ограничены точками (кружочками на рисунке 5.19), в которых значение усилия начального поджатия равно нулю и выполняется условие (5.51). Аналогично кривые  $t_{хх*}$  для заданных значений  $F_{0*}$  со стороны меньших значений  $F_{СТ*}$  ограничены точками, в которых жесткость  $c_* = 1$  и выполняется условие (5.51).

Анализ этих зависимостей указывает на бóльшую в 2–5 раз продолжительность холостого хода, который выполняется с участием электромагнитного тягового усилия  $F_{СТ}$ , по сравнению с рабочим в диапазоне изменения жесткости  $c_*$  от 1 до 6–8. Так, для  $c_* = 8$  и  $F_{0*} = 0$  согласно (5.51) получим  $F_{СТ*} = 5$ . Следовательно, низкое быстродействие ЛЭМД при холостом ходе по сравнению с рабочим объясняется невысоким значением развиваемого двигателем тягового уси-

лия  $F_{СТ*}$  для указанного диапазона жесткости  $c_*$  и при условии безударного холостого хода машины, что снижает динамические свойства данной конструктивной схемы.

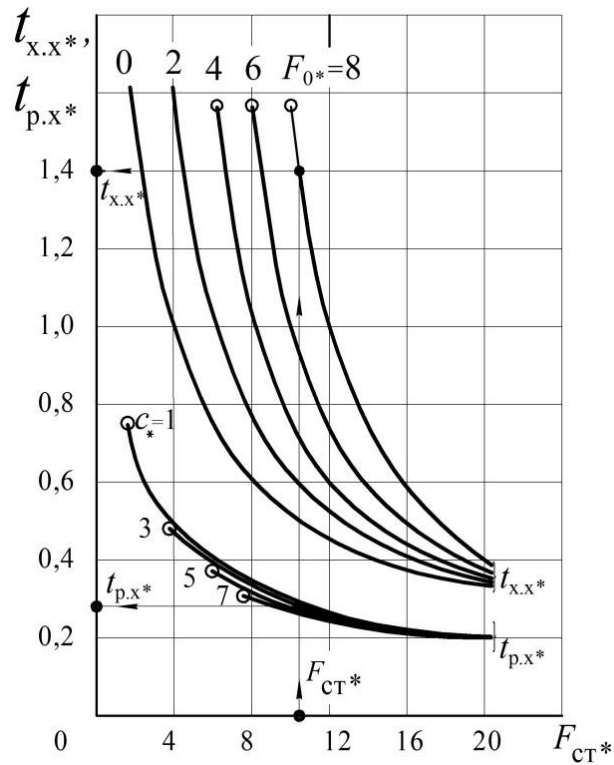


Рисунок 5.19 – Влияние жесткости пружины и статического тягового усилия на времена холостого и рабочего ходов

Время рабочего хода при жесткости  $c_* = \text{const}$  с ростом  $F_{СТ*}$  падает ещё и за счёт роста усилия  $F_{0*}$ , так как запасаемая потенциальная энергия пружины за счет увеличения усилия начального поджатия также возрастает. По сравнению с холостым ходом рабочий ход совершается значительно динамичнее, поскольку он происходит при начальном движущем усилии, превосходящем конечное, что теоретически установлено в [134] и подтверждено экспериментально в [155]. Это обстоятельство удобно использовать для таких технологических операций, как, например, отключение вакуумных выключателей.

При работе импульсного ЛЭМД в режиме непрерывных ходов определим относительную частоту ходов  $n_*$  в минуту, используя (5.61):

$$n_* = \frac{60}{t_{ц*}} = \frac{60 \cdot \sqrt{2c_*}}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{1 + c_*/(F_{СТ*} - 0,5 \cdot c_*)}\right)}. \quad (5.62)$$

На рисунке 5.20 представлены зависимости относительной частоты ходов в минуту, построенные по выражению (5.62) и при выполнении условия (5.51). Из них следует, что с ростом жесткости пружины  $c_*$  и тягового усилия  $F_{СТ*}$  частота ходов машины также растет. При этом одну и ту же частоту ходов можно получить при определенных сочетаниях  $F_{СТ*}$ ,  $c_*$  и  $F_{0*}$ .

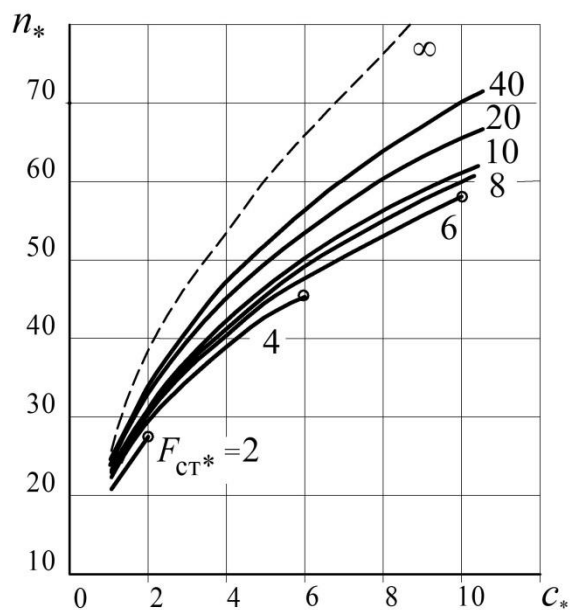


Рисунок 5.20 – Влияние жесткости пружины и статической силы тяги на частоту ходов в минуту

Для конкретных рекомендаций по выбору рациональных значений параметров  $F_{СТ*}$ ,  $c_*$  и  $F_{0*}$  необходимо привлечь дополнительные критерии оценки, например, постоянство энергии удара, ограничение кинетической энергии якоря в конце холостого хода и др.

Из анализа зависимостей (5.62), изображенных на рисунке 5.20, следует вывод о существовании предельной частоты ходов рассматриваемой конструктивной схемы при заданных значениях энергий удара, статической силы тяги ЛЭМД, жесткости пружины или усилия ее начального поджатия. Попытка по-

вышения частоты ходов, например, за счет увеличения частоты следования питающих обмотку ЛЭМД импульсов напряжения источника питания, приводит к снижению энергии удара, что наблюдалось в ходе экспериментов [149]. Резервом для повышения частоты ходов могут служить другие конструктивные схемы, например с двухобмоточным ЛЭМД [156].

На основе формул (5.50), (5.62) и с учётом (5.51) получим выражение ударной мощности двигателя для режима непрерывных ходов [135]:

$$P_{y*} = A_{y*} \cdot n_* = \frac{60F_{CT*} \cdot \sqrt{2c_*}}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{1 + c_*/(F_{CT*} - 0,5 \cdot c_*)}\right)}, \quad (5.63)$$

и представим его в виде семейства кривых (Рисунок 5.21).

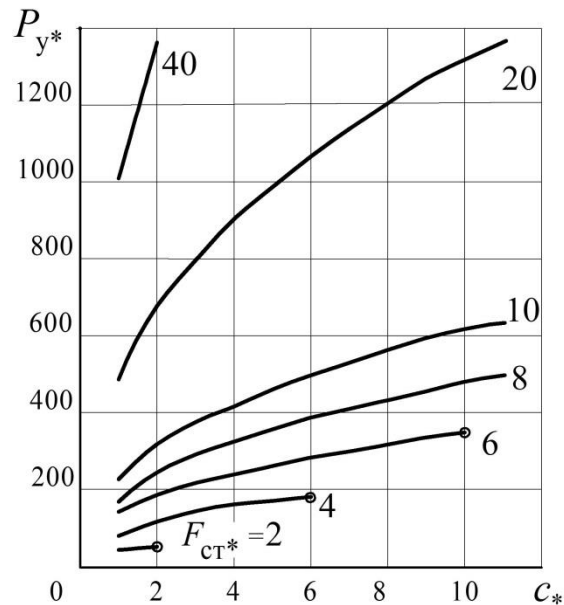


Рисунок 5.21 – Влияние жесткости пружины и статического тягового усилия на ударную мощность машины

Из анализа этих зависимостей следует, что ударная мощность машины растет с увеличением как статической силы тяги ЛЭМД, так и жесткости пружины накопителя. При этом существует для каждой совокупности параметров  $F_{CT*}$ ,  $c_*$  и  $F_{0*}$  предельное значение ударной мощности машины, ограниченное точками, в которых  $F_{0*}=0$ .

Машины, выполненные по рассмотренной конструктивной схеме, характе-

ризуются ограниченной возможностью регулирования энергии удара с помощью устройства питания и управления из-за необходимости замены и регулирования пружины накопителя. При наличии фиксатора конструкция (Рисунок 5.17) позволяет сохранять механическую энергию после «зарядки» механического аккумулятора и использовать её, например, на объектах без электроснабжения [155].

В результате исследования получены приближенные расчетные выражения энергетических и динамических характеристик, которые позволяют выявить возможности конструктивной схемы однообмоточного импульсного ЛЭМД с пружинным накопителем при условии безударного холостого хода и в дальнейшем сравнивать между собой различные конструктивные схемы с однообмоточными двигателями при проектировании электромагнитных приводов.

Для работоспособности исследуемой схемы с пружинным накопителем и при условии безударного холостого хода должно существовать соответствие между параметрами пружинного накопителя и статическим тяговым усилием импульсного ЛЭМД. При работе в режиме непрерывных ходов существует предельная частота ходов и ударная мощность, которые ограничивают производительность импульсной машины.

#### **5.4.2 Основные энергетические и динамические параметры однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной**

Применим принцип взаимности и выражение (5.1) для исследования и расчёта машин ударного действия с приводом от ЛЭМД на примере одной из их конструктивных схем.

Будем считать, что в используемых в приводе ударных машин импульсных ЛЭМД их статические тяговые характеристики неизменны на большей части перемещения якоря, электромагнитное усилие возникает после включения обмотки двигателя без запаздывания [64; 146; 157-159].

Проанализируем работу однообмоточного импульсного ЛЭМД в приводе ударной машины, холостой ход которой совершается под действием возвратной

пружины, а рабочий - за счёт электромагнитного усилия двигателя (Рисунок 5.22).

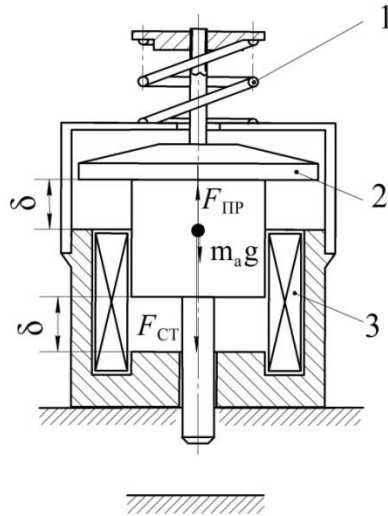


Рисунок 5.22 – Конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной

Машины с такой конструктивной схемой наиболее часто используются в приводе прессового и штамповочного оборудования. Получим для периода рабочего хода машины выражения энергии удара, динамической силы тяги, времени рабочего и холостого хода, частоты ходов и ударной мощности.

Будем считать, что начальная скорость движения якоря массой  $m_a$  равна нулю и противодействующее усилие пружины  $F_{ПР}$  пропорционально перемещению  $\delta$ , жёсткость  $c$  пружины постоянна на всём перемещении якоря, ЛЭМД расположен вертикально.

Применяя выражение (5.1) к данной конструктивной схеме и пренебрегая отскоком якоря ЛЭМД при ударе, получим выражение для энергии

$$A_y = A_K = 0,5(F_{СТ} \cdot \delta + m_a g \cdot \delta - A_{ПР}), \quad (5.64)$$

где  $A_{ПР} = \int_{\delta_n}^{\delta_k} F_{ПР}(\delta) d\delta = \int_{\delta_n}^{\delta_k} c\delta d\delta = 0,5c\delta^2$  – потенциальная энергия, запасаемая в пружине при её деформации на величину перемещения якоря под действием электромагнитного усилия.

Пусть в исходном состоянии начальное усилие пружины  $F_0 = c\delta_0$ , развиваемое ею в случае начального поджатия  $\delta_0$ , равно весу якоря, то есть



$F_0 = G = m_a \cdot g$ . Тогда (5.64) примет вид:

$$A_y = 0,5(F_{CT} \cdot \delta - 0,5c\delta^2). \quad (5.65)$$

Представим выражение (5.65) в относительной форме

$$A_{y*} = A_y / (m_a g \delta) = 0,5(F_{CT*} - 0,5c_*). \quad (5.66)$$

Для нахождения динамической силы тяги  $F_D$  ЛЭМД представим энергию удара в виде суммы двух слагаемых

$$A_y = F_D \cdot \delta - A_{пр}, \quad (5.67)$$

первое из которых характеризует вклад обмотки ЛЭМД в создание энергии удара, второе – уменьшение ее за счет пружины. Из выражения (5.67) с учетом (5.64) получим выражение динамической силы тяги

$$F_D = 0,5m_a g (F_{CT*} + 0,5c_*). \quad (5.68)$$

Представим выражение (5.68) в относительной форме

$$F_{D*} = F_D / (m_a g) = 0,5(F_{CT*} + 0,5c_*). \quad (5.69)$$

На рисунке 5.23 показаны зависимости относительных энергии удара  $A_{y*}$  (штрихпунктирные линии) и динамической силы  $F_{D*}$  (сплошные линии) от относительных статической силы тяги  $F_{CT*}$  и жесткости возвратной пружины  $c_*$ .

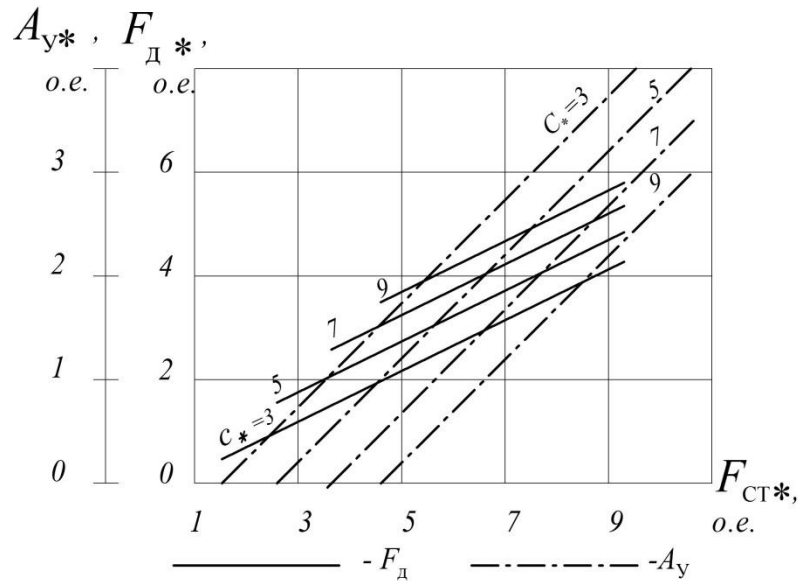


Рисунок 5.23 – Зависимости энергии  $A_y$  и усилия  $F_D$  от режимного  $F_{CT*}$  и конструктивного  $c_*$  параметров

Анализ этих зависимостей показывает, что они с увеличением  $F_{СТ*}$  линейно растут, а с ростом  $c_*$  динамическая сила  $F_{Д*}$  также линейно растёт, а энергия  $A_{у*}$  – линейно падает.

Для определения динамических характеристик ЛЭМД с возвратной пружиной составим дифференциальное уравнение движения его якоря

$$m_a \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = F_H - c \cdot \delta, \quad (5.70)$$

где  $F_H$  – начальное значение силы, движущей якорь.

Используя решение уравнения (5.70), найденное нами в [134], запишем выражение для времени движения якоря

$$t = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{F_K}{F_H} \right), \quad (5.71)$$

где  $F_K$  – конечное значение силы, движущей якорь.

Время движения якоря при рабочем ходе двигателя  $t_{PX}$  определим из (5.71) с учетом  $F_H = F_D$  и  $F_K = F_D - c\delta$ . Тогда получим

$$t_{PX} = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{F_D - c\delta}{F_D} \right). \quad (5.72)$$

С учетом  $c = c_* m_a g / \delta$  и выражения (5.68) формула (5.72) примет вид

$$t_{PX} = \sqrt{\frac{\delta}{gc_*}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( 1 - \frac{2c_*}{F_{СТ*} + 0,5c_*} \right) \right]. \quad (5.73)$$

Время движения якоря при холостом ходе двигателя определим из (5.71) с учетом  $F_H = c\delta$ ,  $F_K = 0$ . Тогда получим

$$t_{XX} = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \cdot \frac{\pi}{2}. \quad (5.74)$$

Представим для удобства анализа выражения (5.73), (5.74) и время цикла ЛЭМД  $t_{Ц} = t_{PX} + t_{XX}$  в относительной форме:

$$t_{PX*} = \frac{t_{PX}}{T_1} = \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( 1 - \frac{2c_*}{F_{*CT} + 0,5c_*} \right) \right]; \quad (5.75)$$

$$t_{XX*} = \frac{t_{XX}}{T_1} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{2(c_* - 1)}}; \quad (5.76)$$

$$t_{Ц*} = t_{PX*} + t_{XX*} = \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( 1 - \frac{2c_*}{F_{СТ*} + 0,5c_*} \right) \right] + \frac{0,5\pi}{\sqrt{2(c_* - 1)}}, \quad (5.77)$$

где  $T_1 = \sqrt{2\delta/g}$  – время свободного падения якоря с высоты  $\delta$ .

На рисунке 5.24 приведены зависимости относительных времен холостого (сплошная линия) и рабочего (пунктирные линии) ходов ЛЭМД в приводе машины с рассматриваемой конструктивной схемой от относительных значений жесткости пружины и статической силы тяги ЛЭМД.

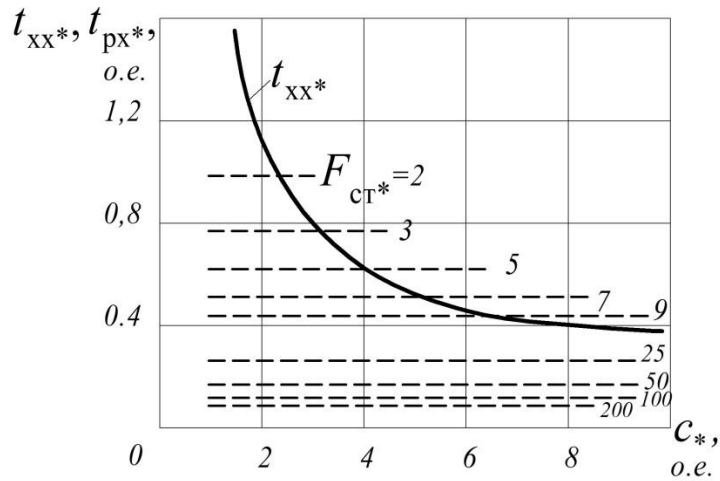


Рисунок 5.24 – Влияние режимного  $F_{СТ*}$  и конструктивного  $c_*$  параметров на времена  $t_{PX*}$  и  $t_{XX*}$

Анализ этих кривых показывает, что с ростом жесткости пружины время холостого хода  $t_{XX*}$ , которое по данным работы [9] составляет 30-45% времени цикла, падает, причем резко на интервале изменений  $c_*$  от 1,5 до 5, стремясь в пределе к нулю. Время рабочего хода  $t_{PX*}$ , как следует из анализа (5.75) при условии  $c_* < 2F_{СТ*}$ , практически не зависит от жесткости  $c_*$  и уменьшается с ростом  $F_{СТ*}$ , также стремясь в пределе к нулю. По экспериментальным данным [9] время рабочего хода невелико и составляет 10-20% от времени цикла. Это свидетельствует о необходимости и важности мер по уменьшению  $t_{XX}$  с целью увеличения производительности оборудования с импульсными ЛЭМД.

Относительная частота ходов в минуту якоря двигателя исследуемой ма-

шины будет:

$$n_* = \frac{60}{t_{Ц*}} = \frac{60}{\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2(c_* - 1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( 1 - \frac{2c_*}{F_{СТ*} + 0,5c_*} \right) \right]}. \quad (5.78)$$

Из графиков (Рисунок 5.25), построенных по (5.78) следует, что с ростом параметров  $c_*$  и  $F_{СТ*}$  частота ходов якоря  $n_*$  растет. При этом одну и ту же частоту ходов можно получить при определённых сочетаниях  $c_*$  и  $F_{СТ*}$  и наоборот. Для конкретных рекомендаций по выбору рациональных значений  $c_*$  и  $F_{СТ*}$  необходимо привлечь дополнительные критерии, например, постоянство энергии удара, ограничение кинетической энергии якоря на холостом ходе и др.

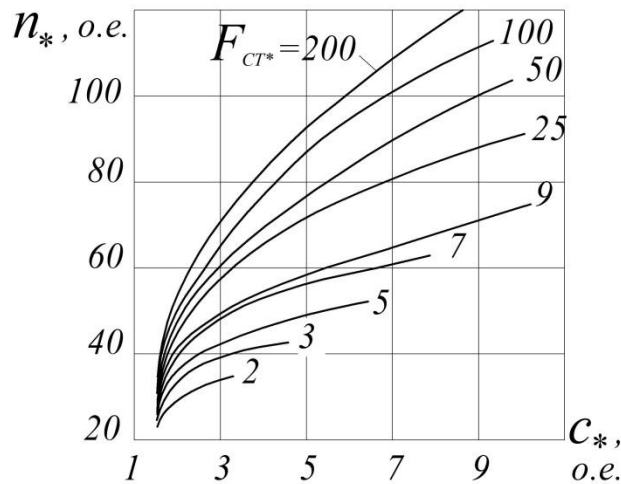


Рисунок 5.25 – Влияние режимного  $F_{СТ*}$  и конструктивного  $c_*$  параметров на частоту ходов в минуту якоря ЛЭМД

Из рисунка 5.26, построенного по (5.66), виден линейный характер уменьшения энергии удара  $A_{y*}$  с ростом жесткости возвратной пружины  $c_*$  и увеличения  $A_{y*}$  с ростом статического тягового усилия  $F_{СТ*}$ .

Из анализа зависимостей, изображенных на рисунках 5.25 и 5.26, следует вывод о существовании предельной частоты ходов рассматриваемой конструктивной схемы машины при заданных значениях энергии удара  $A_{y*}$ , усилия  $F_{СТ*}$  и жесткости  $c_*$ . Дальнейшее повышение частоты ходов, например, за счет увеличения частоты следования питающих обмотку ЛЭМД импульсов напряжения

источника, приведет при вышеназванных условиях к снижению энергии удара  $A_{y*}$ , что наблюдалось в ходе экспериментов.

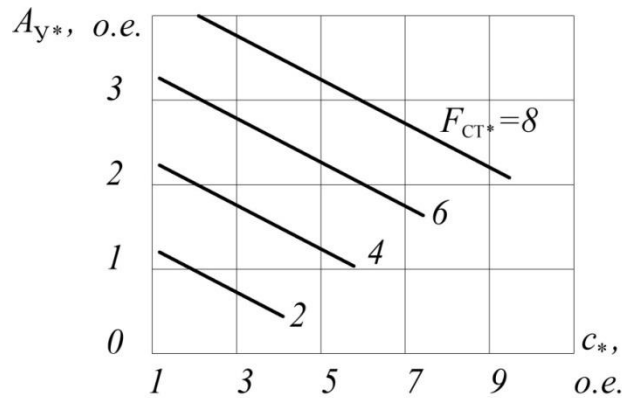
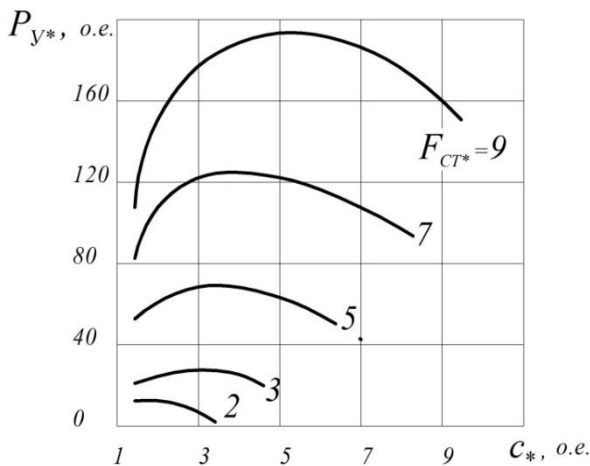


Рисунок 5.26 – Зависимости энергии удара  $A_{y*}$  от режимного  $F_{CT*}$  и конструктивного  $c_*$  параметров

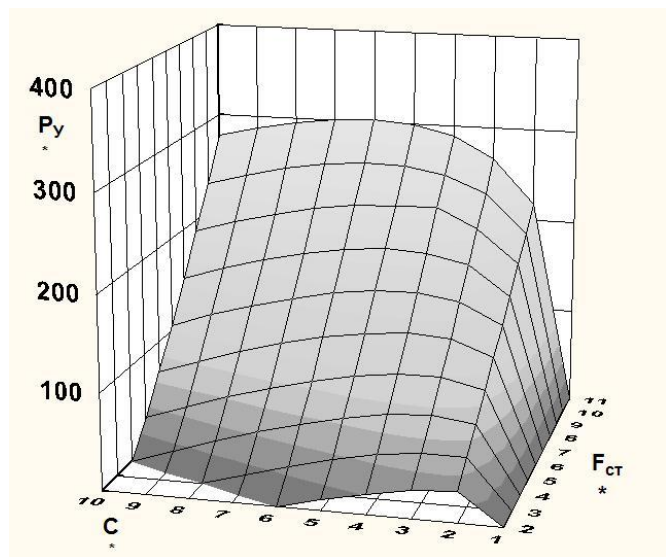
Используя (5.66) и (5.78), получим выражение относительной ударной мощности  $P_{y*}$  ЛЭМД для исследуемой конструктивной схемы:

$$P_{y*} = A_{y*} \cdot n_* = \frac{30(F_{CT*} + 0,5c_*)}{\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2(c_* - 1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(1 - \frac{2c_*}{F_{CT*} + 0,5c_*}\right) \right]}} \quad (5.79)$$

и представим его в виде семейства кривых в функции параметров  $F_{CT*}$  и  $c_*$  (Рисунок 5.27а) и поверхности (Рисунок 5.27б).



а



б

Рисунок 5.27 – Зависимости ударной мощности  $P_{y*}$  от параметров  $F_{CT*}$ ,  $c_*$

Анализ этих зависимостей показывает, что для фиксированных значений статического тягового усилия ( $F_{СТ*} = \text{const}$ ) и жесткости возвратной пружины ( $c^* = \text{const}$ ) существует максимум значения ударной мощности, при котором частота ходов ЛЭМД равна предельной. С ростом усилия  $F_{СТ*}$  максимумы ударной мощности смещаются в сторону больших значений жесткости пружины.

На основе анализа энергетических и динамических параметров однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной установлено, что производительность и ударная мощность машины, построенной по такой конструктивной схеме, в большей степени зависят от времени холостого хода. При заданных энергии удара, тяговом усилии и жесткости возвратной пружины существует предельная частота ходов якоря ЛЭМД и соответствующий ей максимум ударной мощности машины. Дальнейшее повышение частоты ходов влечет за собой снижение энергии удара. Для повышения ударной мощности и частоты ходов машины целесообразно использовать вместо однообмоточного двигателя разработанные нами двухобмоточные конструкции ЛЭМД [156; 158], обеспечивающие активный возврат его якоря в исходное положение.

## **5.5 Расчет основных параметров импульсного ЛЭМД**

### **5.5.1 Расчет основных параметров ЛЭМД по заданной работе**

При проектировании в качестве выходного параметра импульсного ЛЭМД в приводе прессового и технологического оборудования выступает не интегральная работа двигателя, а его полезная работа. Пренебрегая отскоком якоря при ударе, будем считать, что полезная работа ЛЭМД равна его кинетической энергии в момент удара. Полученные в п. 5.1 и работах [120; 146] результаты исследований, основанные на использовании принципа взаимности для ЛЭМД, позволили с учетом принятых допущений установить связь между интегральной и полезной работой ЛЭМД, численно равной энергии удара.

Тогда применительно к электромагнитной машине, работающей в режиме

пресс-молота и выполненной по конструктивной схеме с ЛЭМД и возвратной пружиной, выражение для определения энергии удара в случае вертикального положения ЛЭМД будет иметь вид [149]:

$$A_y = 0,5A_{\text{и}} + (0,5m_a \cdot g \cdot \delta - 0,25c \cdot \delta^2) .$$

Второе слагаемое в этом выражении представляет собой половину потенциальной энергии якоря ЛЭМД и для рассматриваемого типа двигателей более чем на порядок меньше первого по величине. Так, для ЛЭМД прессы ПЭМ-0,8 с массой якоря 3,2 кг и величиной интегральной работы 36Дж первое слагаемое составит 18 Дж, а второе - около 0,5Дж или 2,8% от первого. Поэтому с достаточной для инженерных расчетов точностью можно ограничиться только первым слагаемым, тогда

$$A_{\text{и}} = 2A_y . \quad (5.80)$$

Исходными данными для расчета геометрических размеров ЛЭМД являются: полезная работа (энергия удара  $A_y$ ), продолжительность включения ПВ, превышение температуры  $\tau$ , материал обмоточного провода и класс нагревостойкости его изоляции, материал магнитопровода и максимальное значение индукции в нем при минимальном (нулевом) рабочем зазоре, а также коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания материала магнитопровода.

Расчет производим в следующем порядке.

1. Для ЛЭМД с естественным охлаждением принимаем значение коэффициента теплоотдачи  $K_T = 9-14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град.})$  [9; 160].
2. По выражению (5.80) находим величину интегральной работы.
3. На основании рекомендаций [9] принимаем значения безразмерных параметров, равными  $x=1,5-1,6$ ;  $y=3$ .
4. В зависимости от вида намотки и диаметра провода задаемся значением коэффициента заполнения обмотки  $k_{3\text{м}}$  [9; 160].
5. Находим удельное сопротивление провода  $\rho_\tau = \rho_{20} (1 + \alpha_p \cdot \tau)$  при заданном превышении температуры  $\tau$ , а также коэффициенты  $a_1$ ,  $b_1$  из [161]:

где  $a_1 = \sqrt{2K_T k_{3\text{м}} \tau \cdot \alpha' / (\text{ПВ} \cdot \rho_\tau)}$ ;  $b_1 = \sqrt{(x-1) \cdot [1 + (x-1)/y]}$ .

6. Для заданного значения индукции  $B_k$  и с учетом  $B_6=1$  Тл находим коэффициенты  $q$  по [9], принимая относительную величину начального потокоцепления  $\Psi_{H^*} = 0,15$ :

$$q = \left( \int_0^{B_k} H_* dB_* \right) / (B_{k^*} H_{k^*}) = \frac{0,5(\alpha + \beta \cdot B_{k^*}^4 / 3 + \zeta \cdot B_{k^*}^8 / 5)}{\alpha + \beta \cdot B_{k^*}^4 + \zeta \cdot B_{k^*}^8};$$

$B_{k^*}, H_{k^*}$  – конечные значения индукции и напряжённости магнитопровода;  $\alpha, \beta, \zeta$  – коэффициенты аппроксимации.

7. Находим радиус якоря

$$r_1 = \sqrt[7]{\left( \frac{A_{II}}{3\pi \cdot B_B a_1 b_1 b_2} \right)^2},$$

где  $b_2 = B_{k^*}(1-q) - 0,5 \cdot \Psi_{H^*}$ .

8. С учетом принятых значений параметров  $x$  и  $y$  находим внешний радиус обмотки и ее длину

$$r_2 = (1,5 \dots 1,6) r_1, \quad l_k = 3 r_1.$$

9. Из условия постоянства сечения магнитопровода по его длине находим наружный радиус статора и толщину фланца

$$r_3 = \sqrt{r_1^2 + r_2^2}, \quad e = 0,5 r_1.$$

10. Радиус нижнего направляющего стержня  $r_c$  находим согласно [9].

11. Находим объемы активных материалов двигателя, обмотки и магнитопровода

$$V_d = \pi r_1^3 \cdot (x^2 + 1) \cdot (y + 2e_*); \quad V_M = \pi r_1^3 \cdot (x^2 - 1); \quad V_{CT} = \pi r_1^3 \cdot (x^2 + 2y + 1).$$

Пример расчета импульсного ЛЭМД на полезную работу 18 Дж.

1. Величина интегральной работы  $A_{II} = 2 \cdot 18 = 36$  Дж.

2. Принимаем  $x = 1,5$  и  $y = 3$ . При этом  $K_T = 11,8$  Вт/(м<sup>2</sup>·град.) [9];

$P_B = 0,08$ ;  $\tau = 70^\circ \text{C}$ ;  $\rho_{20} = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;  $\alpha_p = 4,3 \cdot 10^{-3}$  град.<sup>-1</sup> [6];  $B_k = 2,2$  Тл;

$B_6 = 1$  Тл;  $B_{k^*} = 2,2$ ; для стали марки Ст3 коэффициенты аппроксимации приняты  $\alpha = 625$  А/м,  $\beta = -19$  А/м,  $\zeta = 44,5$  А/м [9];  $k_{3M} = 0,6$ ;  $\alpha' = 1,6$ ;  $\Psi_{H^*} = 0,15$ .

3. Удельное сопротивление провода и коэффициенты  $a_1, b_1$  и  $q$  будут со-



ответственно  $\rho_\tau = 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,043 \cdot 70) = 2,21 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м};$

$$a_1 = \sqrt{2 \cdot 11,8 \cdot 0,6 \cdot 70 \tau \cdot 1,6 / (0,08 \cdot 2,21 \cdot 10^{-8})} = 9,47 \cdot 10^5 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1,5};$$

$$b_1 = \sqrt{(1,5 - 1) \cdot [1 + (1,5 - 1) / 3]} = 0,50;$$

$$q = \frac{0,5(625 - 19 \cdot 2,2^4 / 3 + 44,5 \cdot 2,2^8 / 5)}{625 - 19 \cdot 2,2^4 + 44,5 \cdot 2,2^8} = 0,218;$$

$$b_2 = 2,2 \cdot (1 - 0,218) - 0,5 \cdot 0,15 = 1,49.$$

4. Радиус якоря

$$r_1 = \sqrt[7]{\left( \frac{36}{3\pi \cdot 1 \cdot 9,47 \cdot 10^5 \cdot 0,5 \cdot 1,49} \right)^2} = 31,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \text{ примем } r_1 = 31 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$r_2 = 1,5 \cdot 31 \cdot 10^{-3} = 46,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad l_k = 3 \cdot 31 \cdot 10^{-3} = 93 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$r_3 = \sqrt{(31 \cdot 10^{-3})^2 + (46,5 \cdot 10^{-3})^2} = 55,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \text{ примем } r_3 = 55 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\text{Радиус стержня } r_c = 0,32 \cdot 31 \cdot 10^{-3} = 9,92 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \text{ примем } r_c = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

$$5. \text{ Объем двигателя } V_D = \pi(31 \cdot 10^{-3})^3 \cdot (1,5^2 + 1) \cdot (3 + 2 \cdot 0,5) = 12,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3;$$

объем обмотки  $V_M = \pi(31 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 3 \cdot (1,5^2 - 1) = 3,51 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ ; объем магнитопровода  $V_{CT} = 8,69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ .

6. Масса меди  $m_M = \gamma_M \cdot V_M \cdot k_{3M} = 8 \cdot 10^3 \cdot 3,51 \cdot 10^{-4} \cdot 0,6 = 1,68 \text{ кг}$ ; масса стали  $m_{CT} = \gamma_{CT} \cdot V_{CT} = 7,8 \cdot 10^3 \cdot 8,69 \cdot 10^{-4} = 6,78 \text{ кг}$ ; тогда масса двигателя  $m_D = 8,46 \text{ кг}$ .

Разработанная методика инженерного расчета импульсных ЛЭМД по заданной полезной работе позволяет определить основные геометрические размеры магнитной системы двигателя с учетом магнитных свойств магнитопровода, его насыщения и теплового состояния обмотки.

### 5.5.2 Расчет основных параметров ЛЭМД по тяговому усилию

Известные положения расчета учитывали соотношения геометрических параметров двигателя без привязки к конфигурации его магнитной системы, продолжительности включения двигателя и материала магнитопровода [56-58; 61]. Однако к настоящему времени кроме известных магнитных систем появи-

лись и новые: двухзазорные магнитные системы цилиндрической структуры с направляющим корпусом, который может быть выполнен как неферромагнитным, так и ферромагнитным. Эти новые системы позволяют создавать импульсные ЛЭМД со значительно более высокими удельными силовыми и энергетическими показателями [9; 50; 58; 61].

В работах [54; 161] установлены основные размеры и их соотношение для указанных выше магнитных систем импульсных ЛЭМД, исходя из заданной при проектировании интегральной работы – величины магнитной энергии, преобразуемой в механическую работу за рабочий цикл. Такое преобразование магнитной энергии происходит в соответствии с магнитным циклом в координатах «потокосцепление – ток» с учетом продолжительности включения ПВ и температуры  $\tau$  перегрева обмотки возбуждения.

Применение импульсных ЛЭМД в приводе технологического оборудования часто ставит задачу расчета геометрических параметров таких двигателей по заданному при проектировании значению тягового усилия. На практике для ряда технологических операций требуется, чтобы двигатель развивал максимальное тяговое усилие в конце рабочего хода.

Определим, исходя из заданного при проектировании тягового усилия в конце рабочего хода, основные геометрические параметры двухзазорного импульсного ЛЭМД, учитывающие продолжительность включения ПВ двигателя, превышение температуры  $\tau$  его обмотки возбуждения и материал магнитопровода. Поэтому для расчета тягового усилия используют как энергетические формулы, полученные из рассмотрения энергетического баланса электромагнита [57], так и формулу Максвелла, которая при проектных расчетах обеспечивает достаточную для практики точность [9; 56; 68] .

В работе [64] рассмотрена зависимость тягового усилия длинноходового электромагнита от соотношений размеров магнитопровода и установлен максимум этого усилия при неизменном объеме активных материалов. Однако при этом тепловой режим электромагнита не определялся. В работе [68] приведен расчет электромагнита с учетом теплового состояния обмотки при естественном

охлаждении. Однако в нем не задействована длина обмотки, которая также определяет тепловой режим.

Исследуемые нами импульсные ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами по удельной максимальной силе тяги превосходят двигатели длинноходовой подгруппы и короткоходовые с втягивающимся якорем, а также короткоходовые с внешним притягивающимся якорем [9]. В случае укорочения длины магнитной системы исследуемых ЛЭМД и при сохранении неизменным объёма активных материалов двигателя, как показано в работах [77; 117], их силовые показатели существенно возрастают.

Поскольку тяговое усилие импульсного ЛЭМД данной конструкции (Рисунок 2.1) с уменьшением зазора растёт, то его расчет при малых рабочих зазорах  $\delta_k$  ( $\delta_k/r_1 = \delta_{k*} = 0,02 \dots 0,2$ ) значительно упрощен ввиду того, что магнитная цепь двигателя становится сильно насыщенной и потоками рассеяния между якорем и статором можно пренебречь [9].

Для определения зависимости тягового усилия от геометрических параметров используем формулу Максвелла для двух рабочих зазоров в виде:

$$F = \frac{B^2 \cdot \pi \cdot r_1^2}{\mu_0}.$$

Считаем, что магнитная цепь в этом случае не имеет паразитного зазора [56], потери МДС в стали магнитопровода учтём добавлением к значению суммарного зазора слагаемого  $l_{\text{ср.м}}/\mu$ , тогда получим:

$$F_k = \frac{(w \cdot I_\tau)^2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot \mu_0}{(l_{\text{ср.м}}/\mu + 2\delta_k)^2}, \quad (5.81)$$

где  $l_{\text{ср.м}}$  – длина средней магнитной линии;  $\mu$  – среднее значение относительной магнитной проницаемости магнитопровода, соответствующее заданной конечной индукции  $B_k$  в стали;  $w$  – число витков обмотки возбуждения;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Выразим  $l_{\text{ср.м}}$  и  $\delta_k$  через размеры ЛЭМД (Рисунок 2.1), получим

$$\delta_k = r_1 \cdot \delta_{k*},$$

где  $\delta_{к*}$  – относительный конечный рабочий зазор;  $l_{ср.м} = r_1 (2y + x + 1 + \sqrt{x^2 + 1})$ .

Здесь параметры  $x = r_2 / r_1$ ;  $y = l_k / r_1$  взяты из п. 2.1 и работ [9; 54; 55].

Воспользуемся ранее полученными выражениями применительно к двигателям рассматриваемых конструкций, для допустимого по условиям нагрева тока обмотки возбуждения  $I_{\tau*}$ , поверхности охлаждения обмотки  $S_{охл}$ , площади сечения окна намотки  $S_{ок}$  и средней длины витка обмотки возбуждения  $l_{ср}$ :

$$I_{\tau*} = \sqrt{K_T \cdot k_{3M} \cdot \tau \cdot S_{охл} \cdot S_{ок} / (\Pi В \cdot \rho_{\tau} \cdot \ell_{ср})} / (w \cdot I_B);$$

$$S_{охл} = 2\pi \cdot r_1^2 \cdot \alpha' \cdot [y \cdot (x + 1) + x^2 - 1];$$

$$S_{ок} = r_1^2 \cdot y \cdot (x - 1);$$

$$\ell_{ср} = \pi r_1 \cdot (x + 1),$$

а так же коэффициентов  $a_1$  и  $b_1$ :

$$a_1 = \sqrt{2K_T \cdot k_{3M} \cdot \tau \cdot \alpha' / (\Pi В \cdot \rho_{\tau})}; \quad b_1 = \sqrt{(x - 1)[1 + (x - 1) / y]}, \quad (5.82)$$

чтобы получить выражение для допустимой МДС  $w \cdot I_{\tau}$ :

$$wI_{\tau} = a_1 \cdot b_1 \cdot y \cdot \sqrt{r_1^3},$$

где  $k_{3M}$ ,  $K_T$  – коэффициенты заполнения и теплоотдачи (эквивалентный) обмотки;  $\rho_{\tau}$  – удельное сопротивление провода при превышении температуры  $\tau$ ;  $\alpha'$  – эмпирический коэффициент, учитывающий условия теплоотдачи [9; 61].

Подставляя их в выражение (5.81), получим соотношение, связывающее тяговое усилие ЛЭМД, параметры  $x$ ,  $y$  и радиус якоря  $r_1$ :

$$F_K^2 = \pi \cdot r_1^5 \left( \frac{B_K \cdot y \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \mu}{2y + x + 1 + \sqrt{x^2 + 1} + 2\delta_{к*} \cdot \mu} \right)^2 \quad (5.83)$$

Индукция в стали  $B_K$  и значение  $\mu$  связаны между собой через кривую намагничивания. Воспользуемся аппроксимацией кривой намагничивания в виде полинома [9; 54; 161]

$$H = \alpha \cdot B_* + \beta \cdot B_*^5 + \xi \cdot B_*^9$$

и выразим относительную магнитную проницаемость стали как отношение

напряжённостей магнитного поля  $H_{0K}$  и  $H_{CT,K}$ , обеспечивающих одну и ту же индукцию в рабочем зазоре и стали:

$$\mu = \frac{H_{0K}}{H_{CT,K}} = \frac{B_B}{\mu_0 \cdot (\alpha + \beta \cdot B_{K*}^4 + \xi \cdot B_{K*}^8)},$$

где  $B_{K*} = B_K / B_B$  – относительное значение индукции, соответствующее максимально допустимой МДС при конечном зазоре;  $B_B = 1\text{Тл}$  – базисное значение магнитной индукции;  $\alpha, \beta, \xi$  – коэффициенты аппроксимации [9; 161].

Из (5.83) с учётом последней формулы получим базисный размер ЛЭМД:

$$r_1 = 5 \sqrt{\frac{F_K^2}{\pi} \cdot \left( \frac{(2y + x + 1 + \sqrt{x^2 + 1}) \cdot (\alpha + \beta \cdot B_{K*}^4 + \xi \cdot B_{K*}^8) \mu_0 / B_B + 2\delta_{K*}}{y \cdot B_K \cdot a_1 \cdot b_1} \right)^2} \quad (5.84)$$

Выражение (5.84) используем при разработке методики расчета. Исходными данными для расчёта геометрических параметров импульсного ЛЭМД по заданному тяговому усилию в конце хода являются: максимальное тяговое усилие  $F_K$ , продолжительность включения ПВ, превышение температуры  $\tau$  обмотки, материал обмоточного провода и класс нагревостойкости его изоляции, материал магнитопровода и максимальное значение индукции  $B_K$  при конечном (минимальном) рабочем зазоре  $\delta_K$ , коэффициенты  $\alpha, \beta, \xi$  аппроксимации кривой намагничивания.

Расчёт импульсного ЛЭМД исходя из заданного конечного тягового усилия, производим в следующем порядке:

1. Для ЛЭМД с естественным охлаждением принимаем значение коэффициента теплоотдачи  $K_T = 9 \dots 14 \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$  [9].
2. В зависимости от вида намотки и диаметра провода задаёмся коэффициентом заполнения обмотки  $k_{зм}$  [117].
3. На основании рекомендаций [161] принимаем значение безразмерного параметра  $x = 1,5 \dots 1,6$ , а для укороченной магнитной системы примем длину обмотки  $y = 1,5$ .
4. Находим удельное сопротивление провода  $\rho_\tau = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_p \cdot \tau)$  при заданном превышении температуры, а также коэффициенты  $a_1$  и  $b_1$  из (5.82)

5. Определяем относительное значение индукции в магнитопроводе  $B_{K*}$  и с учетом коэффициентов аппроксимации для кривой намагничивания материала магнитопровода, по формуле (4.84) находим радиус якоря.

6. С учетом принятых значений  $x$  и  $y$  определяем внешний радиус и длину обмотки:

$$r_2 = x \cdot r_1, \quad l_K = y \cdot r_1.$$

7. Из условия постоянства сечения стали по длине магнитопровода определяем радиус  $r_3$  и толщину фланца  $e$  (Рисунок 5.28):

$$r_3 = \sqrt{r_1^2 + r_2^2}, \quad e = 0,5r_1.$$

8. Радиус нижнего направляющего стержня находим согласно [9; 161]:

$$r_c = 0,32r_1.$$

9. Определяем объемы и массы активных материалов двигателя, обмотки и магнитопровода [9; 161]:

$$V_d = \pi r_1^3 \cdot (x^2 + 1) \cdot (y + 2e_*); \quad (5.85)$$

$$V_M = \pi r_1^3 \cdot (x^2 - 1); \quad V_{CT} = \pi r_1^3 \cdot (x^2 + 2y + 1);$$

$$m_M = \gamma_M \cdot k_{3M} \cdot V_M; \quad m_{CT} = \gamma_{CT} \cdot V_{CT}; \quad m_D = m_M + m_{CT}.$$

В таблице 5.1 приведены результаты расчета массогабаритных показателей импульсных ЛЭМД на тяговое усилие  $F_K = 10^5$  Н с длиной обмотки  $y = 3$  и  $y = 1,5$  при значениях  $x = 1,41$  и  $x = 1,6$ .

Из таблицы 5.1 следует, что объемы обмотки  $V_M$  и магнитопровода  $V_{CT}$  существенно зависят от безразмерных параметров  $x$  и  $y$ , характеризующих особенности магнитной системы двигателя. Так, уменьшая безразмерный параметр  $x$  от 1,6 до 1,41, характеризующий высоту окна намотки обмотки возбуждения, можно уменьшать эту высоту и, тем самым, уменьшать объем обмотки  $V_M$ . Однако при этом становится более напряженным ее тепловой режим.

Аналогичные изменения происходят и при уменьшении относительной длины обмотки  $y$  с 3 до 1,5, когда ее объем также снижается. Для таких значений параметров  $x$  и  $y$  расчет радиуса якоря  $r_1$  по выражению (5.84) дает его уве-

личенное значение. Оно соответствует росту поверхностей взаимодействия в рабочих зазорах двигателя и росту тягового усилия двигателя, которое теперь возможно создавать за счет меньшей МДС обмотки и при ее меньшем объеме, но при бóльших объемах магнитопровода и двигателя.

Таблица 5.1– Массогабаритные показатели импульсного ЛЭМД на тяговое усилие  $F_k=10^5$  Н

Параметры	$x=1,41$		$x=1,6$	
	$y=3$ *	$y=1,5$	$y=3$	$y=1,5$
Радиус якоря $r_1$ , м	0,099	0,113	0,0879	0,104
Объем обмотки $V_M$ , м <sup>3</sup>	0,00878	0,00672	0,00999	0,00827
Объем магнитопровода $V_{СТ}$ , м <sup>3</sup>	0,0273	0,02714	0,0204	0,0232
Объем активных материалов $V_D$ , м <sup>3</sup>	0,0361	0,03386	0,03034	0,0315
Масса обмотки $m_M$ , кг	54,1	32,3	47,9	39,7
Масса магнитопровода $m_{СТ}$ , кг	206	211,7	159,1	179,4
Масса двигателя $m_D$ , кг	260,1	244,0	207,0	219,1

\*Результаты в первом столбце таблицы 1 ( $x=1,41$  и  $y=3$ ) взяты из [9], где не была учтена продолжительность включения двигателя. В трех остальных столбцах помещены результаты расчета, предлагаемого в данной работе.

Однако с ростом  $r_1$  также возрастает и средняя длина витка обмотки, что неэффективно. И наоборот, увеличение параметров  $x$  и  $y$  вызывает рост объема обмотки  $V_M$ , делая ее тепловой режим менее напряженным. Такое сочетание дает по выражению (5.84) уменьшенное расчетное значение радиуса  $r_1$ , снижая теперь объем магнитопровода и всего двигателя (объем активных материалов).

В результате расчетов установлено, что при изменении конструктивного параметра  $x$  от 1,41 до 1,6 (на 13%) происходят неодинаковые изменения объемов  $V_M$  и  $V_{СТ}$ : для обмотки изменение объема практически такое же (на 14%), а для магнитопровода – гораздо существеннее (на 25%). Поэтому для окончательного выбора значений параметров  $x$  и  $y$  требуется оптимизация, например, по критерию  $F_k/V_D$  с помощью выражений (5.84) и (5.85).

Проведенный анализ позволил установить основные размеры импульсного ЛЭМД для заданного при проектировании тягового усилия в конце рабочего хо-

да якоря и разработать методику предварительного расчета таких двигателей.

### **Выводы**

1. На основе взаимных соотношений для электромеханических систем впервые установлено обобщенное соотношение между энергией рабочего хода (энергией удара) и интегральной работой применительно к каждому энергетическому режиму, в котором работает импульсный ЛЭМД. Это соотношение используется для детального анализа и сравнения энергетических и динамических характеристик различных конструктивных схем электромагнитных машин.

2. Впервые выявлен генераторный эффект в период рабочего хода для ряда конструктивных схем электромагнитных машин. Установлено, что ввод механической энергии в электромеханическую систему может вызвать как снижение тягового усилия и механической работы, когда направления тягового и стороннего усилий совпадают, так и их повышение, когда эти направления противоположны.

3. возможно снижение тягового усилия и, как следствие, энергии рабочего хода из-за того, что величина статического тягового усилия двигателя по сравнению с силой тяжести его якоря невелика (превышает в 3...5 раз). Это создает возможность появления генераторного эффекта. Наоборот, в конструктивных схемах однообмоточной машины с возвратной и накопительной пружинами снижения тягового усилия и энергии рабочего хода не наблюдается, так как относительное тяговое усилие превышает 20...100.

4. Определены границы области минимального статического тягового усилия, обеспечивающего эффективный двигательный режим для конструктивных схем молота двойного действия и многосекционной машины в период рабочего хода.

5. На основе соотношений принципа взаимности получены и проанализированы основные энергетические и динамические параметры однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной. Установлено, что производительность и ударная мощность однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной в значительной сте-



пени зависят от времени холостого хода. При заданных энергии удара, тяговом усилии и жесткости возвратной пружины существует предельная частота ходов якоря ЛЭМД и соответствующий ей максимум ударной мощности машины. Дальнейшее повышение частоты ходов влечет за собой снижение энергии удара.

6. Выявлена предпочтительность конструктивной схемы однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем по энергетическим характеристикам и их стабильности.

7. Развита принцип взаимности для импульсных электромагнитных машин, позволяющий на основе информации об их статических тяговых характеристиках и интегральной механической работе определять основные энергетические и динамические параметры.

## ГЛАВА 6. РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД С ПОВЫШЕННЫМИ СИЛОВЫМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

### 6.1 Рабочие процессы в импульсном ЛЭМД при его статическом нагружении

#### 6.1.1 Влияние нагружения импульсного ЛЭМД на его энергетические и динамические характеристики

В главе 3 был теоретически обоснован принцип увеличения уровня аккумулируемой магнитной энергии, сформулированный в [30], и на основе исследований [9; 50; 93; 99; 109; 119; 162] показана необходимость концентрации магнитной энергии рабочих воздушных зазоров импульсного ЛЭМД на этапе трогания якоря для повышения удельных энергетических показателей. Практическая реализация указанного способа повышения этих показателей состоит в приложении к якорю двигателя на этапе трогания противодействующего усилия  $F_{\text{п}}(x)$  [102; 106; 127; 128]. Оно препятствует движению якоря до момента достижения током обмотки заданной величины, которая определяет заданное начальное противодействующее усилие – усилие удержания  $F_{\text{уд}} = F_{\text{п}}(x_1)$  при  $t \leq t_0$ .

Исследуем влияние начального противодействующего усилия  $F_{\text{п}}$  на некоторые энергетические и временные характеристики импульсных ЛЭМД. Для этого из уравнения баланса сил, действующих на якорь,

$$m_a \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{\text{э}}(x) - F_{\text{п}}(x)$$

можно получить уравнение энергетического баланса [93; 99; 162] при нулевой начальной скорости ( $V_{\text{н}}=0$ ):

$$m_a \cdot \frac{V_{\text{к}}^2}{2} = \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{э}}(x) dx - \int_{x_1}^{x_2} f_{\text{п}}(x) dx, \quad (6.1)$$

где  $m_a$  и  $x=(x_2-x_1)$  – масса и перемещение якоря;  $F_{\text{э}}(x)$  – электромагнитное усилие;  $V_{\text{к}}$  – конечная скорость движения якоря;  $x_1$  и  $x_2$  – начальное и конечное

значения перемещения.

Пусть усилие  $F_{\Pi}(x)$  изменяется скачком в соответствии с графиком (Рисунок 6.1) и выражением (6.2)[87; 88; 109]:

$$F_{\Pi}(x) = \begin{cases} F_{уд} & \text{при } t \leq t_0 \text{ и } x = x_1; \\ f_{\Pi}(x) & \text{при } t > t_0 \text{ и } x \neq x_1. \end{cases} \quad (6.2)$$

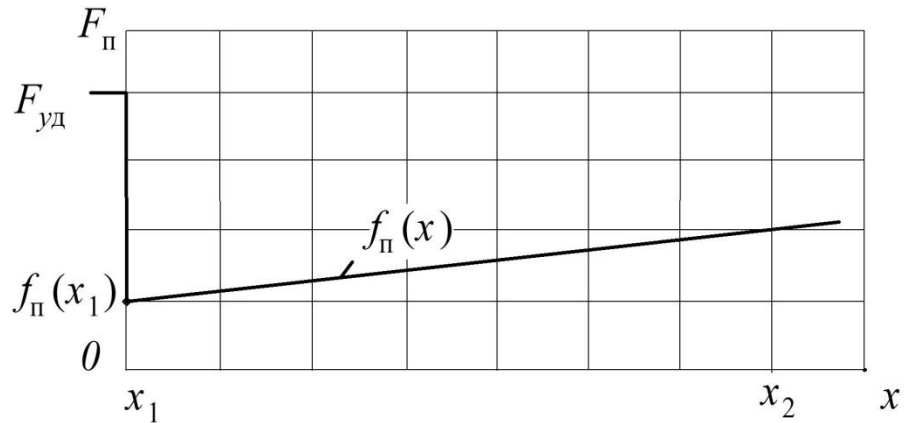


Рисунок 6.1 – Изменение противодействующего усилия по перемещению

Так как при движении якоря импульсного ЛЭМД в приводе машин ударного действия противодействующее усилие  $F_{\Pi}(x)$  обусловлено в основном возвратной пружиной, а электромагнитное тяговое усилие  $F_3(x)$  во много раз больше усилия  $f_{\Pi}(x)$ , то примем  $f_{\Pi}(x) \approx 0$ . Тогда (6.1) упростится, а электромагнитное усилие  $F_3(x)$  будет представлять собой динамическое усилие:

$$m_a \cdot \frac{V_{\kappa}^2}{2} = \int_{x_1}^{x_2} F_3(x) dx. \quad (6.3)$$

Выразим при этих условиях правую часть (6.3) как механическую работу  $A$  при движении якоря на участке от  $x_1$  до  $x_2$  и преобразовании в нее магнитной энергии двигателя. Для этого воспользуемся вебер-амперными магнитными характеристиками при насыщенной магнитной системе ЛЭМД за время движения его якоря. Поскольку в практически реализованных конструкциях импульсных ЛЭМД наиболее часто встречается случай, когда при максимальном (начальном) рабочем зазоре  $\delta_1 = \delta_n$  магнитная система двигателя не насыщена, а при малом зазоре  $\delta_2 = \delta_k$  — насыщена, то примем магнитные характеристики  $\Psi(I)$  соответ-

ственно линейными в начале хода и нелинейными в конце хода. Зависимость потокосцепления от тока для конечного зазора  $\delta_2 = \delta_k = 0$  (кривую намагничивания магнитопровода) аппроксимируем двумя участками кривой  $OKD$  (Рисунок 4.20) на линейном участке – отрезком  $OK$ , на участке насыщения – кривой  $KD$ . Аналогичную зависимость для начального зазора  $\delta_1 = \delta_n$  аппроксимируем отрезком  $OA$ . Линейный участок  $OK$  магнитной характеристики с индуктивностью  $L_k$  для конечного зазора  $\delta_k$  проведен под углом  $\Theta_k$  и характеризует конечное положение якоря, а также величину остаточной магнитной энергии, не преобразованной к концу перемещения в механическую энергию. В начальном положении якоря при зазоре  $\delta_1 = \delta_n$  магнитная характеристика с индуктивностью  $L_n$  проведена под углом  $\Theta_n$  и характеризует запас магнитной энергии в магнитной системе двигателя на этапе трогания якоря. Оба угла являются обобщёнными конструктивными параметрами импульсного ЛЭМД.

В п.4.2 установлены энергетические показатели режимов импульсного ЛЭМД, магнитная система которых является ненасыщенной [99]. Рассмотрим влияние начального противодействующего усилия на энергетические и динамические показатели импульсного ЛЭМД для двух энергетических режимов: режим 3 ( $\Psi_k > \Psi_n$ ,  $I_k < I_n$ , при  $-1 < k_b < 0$ ) – цикл  $OA_{(3)}K0$  и режим 2 ( $\Psi_k = \text{const}$ ,  $I_k < I_n$ , при  $k_b = -1$ ) – цикл  $OA_{(2)}K0$ , обладающих наибольшей эффективностью электромеханического преобразования (Рисунок 4.20). Второй из рассматриваемых режимов возможно реализовать, используя предложенный нами способ нагружения импульсного ЛЭМД, снабженного устройством удержания якоря [9; 106; 127; 128] или используя форсированный режим питания [117]. Выберем траектории движения рабочей точки в плоскости «потокосцепление - ток» (Рисунок 4.20) так, чтобы при движении рабочая точка не попадала в зону магнитной характеристики, соответствующей нулевому рабочему зазору и насыщенной магнитной системе двигателя. При такой постановке возможно использование для расчета энергетических характеристик насыщенной магнитной системы выражений, полученных ранее для ненасыщенной магнитной системы [99].

Тогда согласно [99] запишем для режимов 3 и 2, по которым функциони-

рует импульсный ЛЭМД, выражения механической работы в виде энергии удара соответственно:

$$A_{y(3)} = 0,5 \cdot \Psi_K \cdot I_K \cdot k_{(3)} \cdot \left( \frac{m-1}{m} \right); \quad (6.4)$$

$$A_{y(2)} = 0,5 \cdot \Psi_K \cdot I_K \cdot (m-1), \quad (6.5)$$

где  $m = L_K/L_H$ ,  $k_{(реж)} = I_{H(реж)}/I_K = I_{Tr(реж)}/I_K$  – соответственно кратности изменения индуктивности и тока обмотки возбуждения за интервал движения якоря, причем согласно п.4.5  $m \geq k_{(реж)} > \sqrt{m}$ .

Тогда из (6.3) с учетом (6.4) получим выражение конечной скорости  $V_{K(3)}$  движения якоря для режима 3:

$$V_{K(3)} = \sqrt{\frac{\Psi_K \cdot I_K \cdot (m-1) \cdot k_{(3)}}{m_a \cdot m}}. \quad (6.6)$$

Аналогично для режима 2 ( $\Psi_K = \text{const}$ ) с учетом (6.5) получим:

$$V_{K(2)} = \sqrt{\frac{\Psi_K \cdot I_K \cdot (m-1)}{m_a}}. \quad (6.7)$$

Согласно [163] начальные значения потокоцепления и тока, соответствующие моменту окончания движения якоря, представим для рассматриваемых режимов через конечную индуктивность  $L_K$  для ненасыщенной магнитной системы импульсного ЛЭМД:

$$\Psi_K = \sqrt{2F_{уд} \cdot x \cdot L_K}; \quad I_K = \sqrt{\frac{2F_{уд} \cdot x}{L_K}}; \quad (6.8)$$

С учетом (6.8) выражения (6.6) и (6.7) для конечных скоростей  $V_{K(3)}$  и  $V_{K(2)}$  примут вид:

$$V_{K(3)} = \sqrt{\frac{2F_{уд} \cdot x \cdot (m-1) \cdot k_{(3)}}{m_a \cdot m}}; \quad (6.9)$$

$$V_{K(2)} = \sqrt{\frac{2F_{уд} \cdot x \cdot (m-1)}{m_a}}. \quad (6.10)$$

При работе импульсного ЛЭМД по рассматриваемым режимам 2 и 3 в п. 4.5 установлено, что тяговое усилие меняется незначительно, а якорь дви-

жется равноускоренно. Поэтому для них легко найти время движения на перемещении  $x = x_2 - x_1$ :

$$t_{\text{дв}(3)} = \frac{x}{V_{\kappa(3)}} = \sqrt{\frac{x \cdot m_a \cdot m}{2F_{\text{уд}} \cdot (m-1) \cdot k_{(3)}}}; \quad (6.11)$$

$$t_{\text{дв}(2)} = \frac{x}{V_{\kappa(2)}} = \sqrt{\frac{x \cdot m_a}{2F_{\text{уд}} \cdot (m-1)}}. \quad (6.12)$$

Соответственно найдём энергии удара  $A_{\text{уд}(3)}$  и  $A_{\text{уд}(2)}$  как кинетические энергии при конечной скорости:

$$A_{\text{уд}(3)} = \frac{m_a \cdot V_{\kappa(3)}^2}{2} = \frac{F_{\text{уд}} \cdot x \cdot (m-1) \cdot k_{(3)}}{m}; \quad (6.13)$$

$$A_{\text{уд}(2)} = \frac{m_a \cdot V_{\kappa(2)}^2}{2} = F_{\text{уд}} \cdot x \cdot (m-1). \quad (6.14)$$

Для анализа динамических и энергетических характеристик исследуемых магнитных циклов, по которым работает импульсный ЛЭМД, выразим полученные зависимости (6.11)-(6.14) в относительных единицах, приняв за базисные величины время свободного падения  $T = \sqrt{2x/g}$  якоря массой  $m_a$  с высоты  $x$  и потенциальную энергию  $m_a \cdot g \cdot x$ . Тогда получим для режима 3 относительное время движения  $t_{\text{дв}(3)*}$  и энергию удара  $A_{\text{уд}(3)}$  соответственно:

$$t_{\text{дв}(3)*} = \frac{t_{\text{дв}(3)}}{T} = \sqrt{\frac{m}{F_{\text{уд}*} \cdot (m-1) \cdot k_{(3)}}}; \quad (6.15)$$

$$A_{\text{уд}(3)*} = \frac{A_{\text{уд}(3)}}{m_a \cdot g \cdot x} = \frac{F_{\text{уд}*} \cdot (m-1) \cdot k_{(3)}}{m}. \quad (6.16)$$

Для режима 2 ( $\Psi = \text{const}$ ):

$$t_{\text{дв}(2)*} = \frac{t_{\text{дв}(2)}}{T} = \sqrt{\frac{1}{F_{\text{уд}*} \cdot (m-1)}}; \quad (6.17)$$

$$A_{\text{уд}(2)*} = \frac{A_{\text{уд}(2)}}{m_a \cdot g \cdot x} = F_{\text{уд}*} \cdot (m-1), \quad (6.18)$$

где  $F_{\text{уд}*} = \frac{F_{\text{уд}}}{m_a \cdot g}$  – относительное усилие удержания якоря.

По выражениям (6.15)-(6.18) построим семейства характеристик  $t_{дв*} = f(F_{уд*})$  и  $A_{уд*} = f(F_{уд*})$  при неизменных режимных ( $k_{(реж)} = \text{const}$ ) и заданном конструктивном параметре  $m = 5,17$ . Параметр  $m = 5,17$  соответствует начальному углу  $\Theta_n = 28^\circ$  при конечном угле  $\Theta_k = 70^\circ$ . Отметим, что для режима 3 кратность изменения тока будет лежать в пределах  $2,27 < k_{(3)} < 5,17$ . Характеристики представлены на рисунках 6.2 и 6.3 [109].

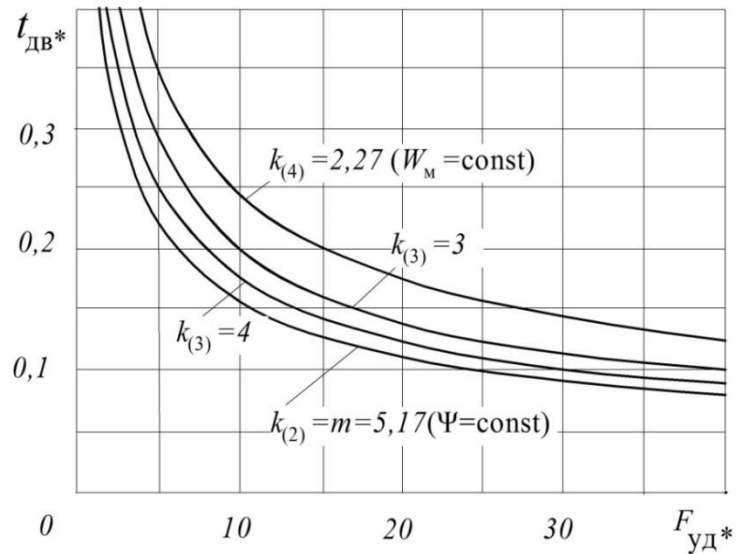


Рисунок 6.2 – Влияние усилия удержания  $F_{уд*}$  на время движения  $t_{дв*}$  при  $m = 5,17$

Их анализ показывает, что при увеличении удерживающего усилия  $F_{уд*}$  время движения уменьшается, а энергия удара возрастает. Причем в диапазоне изменения усилия удержания  $F_{уд*}$  от 5 до 20 изменение времени движения довольно значительное (в 2...4 раза), тогда как при  $F_{уд*} > 20$  оно мало меняется. Приближение режимного параметра  $k_{(реж)}$  к кратности изменения индуктивности  $m$  вызывает сокращение времени движения за счет увеличения магнитной энергии в рабочих зазорах, преобразуемой в механическую работу. Причем при таком увеличении доля магнитной энергии, запасаемая на этапе трогания, растет, в то время как доля магнитной энергии, запасаемая в процессе движения якоря, наоборот, падает и стремится к нулю.

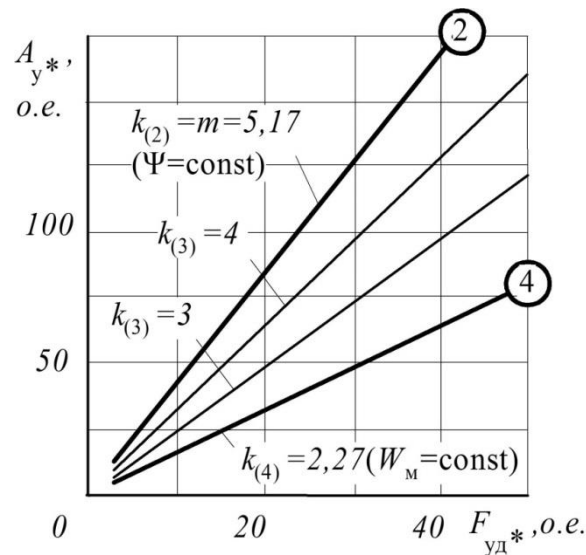


Рисунок 6.3 – Влияние усилия удержания  $F_{уд*}$  на энергию удара  $A_{уд*}$  при  $m = 5,17$

При  $k_{(2)} = m$  ( $\Psi = \text{const}$ ) наблюдается самое быстрое движение якоря за счет наибольшего количества магнитной энергии, накопленной в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД на этапе трогания. И для режима 3 наибольший прирост энергии удара с ростом усилия  $F_{уд*}$  также наблюдается при стремлении кратности тока  $k$  к кратности изменения индуктивности  $m$ .

Следует заметить, что снизить усилие удержания до нуля на практике невозможно из-за наличия трения в местах сочленения движущихся частей конструкции двигателя, а также из-за динамического усилия, возникающего при разгоне якоря. Экспериментальные исследования импульсного ЛЭМД, например, типа ПЭМ-0,8 с устройством удержания якоря показывают, что за счет применения устройства удержания якоря, дополняющего конструкцию двигателя, можно радикально улучшить как динамические, так и энергетические показатели двигателя [9; 102; 106; 126-128].

### 6.1.2 Рабочие процессы импульсных ЛЭМД с регулируемым аккумулярованием магнитной энергии

Повышение удельных энергетических показателей импульсных ЛЭМД [30] может быть осуществлено с помощью способа искусственного создания усилия, противодействующего движению якоря. Применительно к редкоудар-



ным электромагнитным машинам это реализуется созданием такого режима двигателя, когда на этапе трогания его якоря искусственно создают статическое противодействующее усилие в начале хода – усилие удержания  $F_{уд}$ , которое после возрастания тока импульсного ЛЭМД и его начального тягового усилия  $F_n$  до заданной величины и начала движения якоря уменьшается до нуля [9; 18; 19; 50; 101; 106; 109; 165]. Как показано в п.6.1.1, такой режим работы ЛЭМД при существующих ограничениях хода якоря и значительной электромагнитной постоянной времени обмотки возбуждения, которая обуславливает относительно медленное нарастание тягового усилия, повышает энергию удара, КПД двигателя, а также быстродействие.

В работе [9] рассмотрена конструкция импульсного ЛЭМД с автономным устройством удержания якоря (УЯ), реализующая способ статического нагружения и рассмотренный выше режим работы ЛЭМД, сформулированы требования к устройству УЯ, установлены соотношения между энергетическими характеристиками двигателя и времени удержания якоря, при которых существует компромисс между уровнем запасаемой в рабочих зазорах магнитной энергии и экономичностью преобразования электрической энергии  $W_{эл}$  источника в магнитную с учетом потерь в обмотке двигателя. В работе [78] была предложена конструкция электромагнитного молота с ЛЭМД и автономным устройством УЯ, реализующая способ нагружения двигателя и дополнительно позволяющая осуществить такие требования, как способность регулировать усилие удержания и обеспечивать релейную характеристику устройства УЯ.

В работах [106; 119; 127; 128] предложена конструкция электромагнитного привода с импульсным ЛЭМД и встроенным устройством УЯ, что позволило упростить, повысить надежность устройства и технологичность его изготовления (Рисунок 6.4).

Для этого устройство УЯ выполнено на основе цилиндрического магнита с внешним притягивающимся якорем. Импульсный ЛЭМД с комбинированным якорем и устройством УЯ (Рисунок 6.4) содержит массивный комбинированный якорь с притягивающейся дисковой частью 1, втяжной частью 2 и статор 3, в

расточке которого помещена обмотка возбуждения 4, возвратную пружину 5 и направляющий корпус 6.

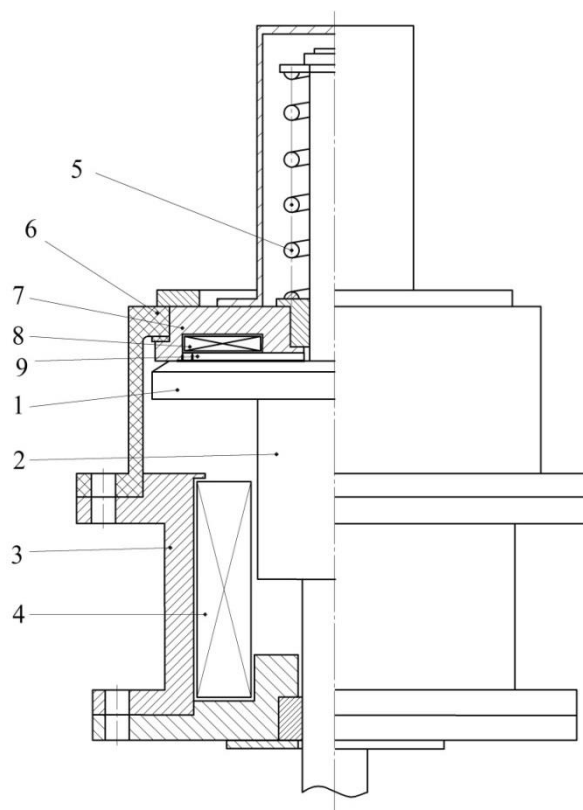


Рисунок 6.4 – Импульсный ЛЭМД со встроенным устройством удержания якоря

Устройство УЯ состоит из удерживающего магнита с броневым магнитопроводом 7, встроенным в направляющий корпус 6, и кольцевой полостью, в которой размещена либо обмотка 8, либо постоянный магнит, сменного полюсного наконечника 9. Удерживающий магнит установлен в направляющем корпусе соосно якорю и взаимодействует своим полюсным наконечником 9 с шайбой. Полюсный наконечник 9 обеспечивает создание значительной силы сопротивления движению в начале хода при крайне малом сопротивлении движению на остальной части хода.

Движение якоря начнется лишь тогда, когда возрастающее тяговое усилие двигателя в его исходном положении превысит усилие удержания. При этом якорь ЛЭМД начнет интенсивно разгоняться. Когда тяговое усилие ЛЭМД спадет, якорь под действием возвратной пружины займет исходное положение.

Оценим регулировочные свойства импульсного ЛЭМД с устройством УЯ.

В исходном состоянии удерживающий магнит создает усилие удержания  $F_{уд}$ . Следовательно, якорь двигателя нагружается начальным статическим противодействующим усилием  $F_{нс}$ , равным усилию  $F_{уд}$ , и движение якоря начнется лишь тогда, когда возрастающее тяговое усилие  $F_n$  ЛЭМД в его начальном положении превысит усилие  $F_{уд}$ , то есть после выполнения условия  $F_{уд} > F_{нс} = F_{уд}$ . При этом из-за возникающего воздушного зазора между шайбой и удерживающим магнитом и отмеченной выше тяговой характеристики магнита исключается влияние усилия  $F_{уд}$  на процесс перемещения якоря. Значит, в момент трогания якоря усилие  $F_{нс}$ , обусловленное удерживающим магнитом, скачкообразно заменяется равным ему динамическим противодействующим усилием  $F_d = m_a \cdot a_n$ , где  $m_a$  и  $a_n$  – масса и ускорение якоря в момент трогания. Если якорь в пределах рабочего хода перемещается под действием динамического усилия, представленного в виде  $F_d = F_{нс} \cdot f(\delta)$ , где  $f(\delta)$  – некоторая функция перемещения, учитывающая характеристику возвратной пружины, то энергия удара  $A_y$  может быть выражена

$$A_y = \int_0^{\delta} F_d(\delta) d\delta = F_{уд} \cdot \int_0^{\delta} f(\delta) d\delta.$$

Откуда следует, что, устанавливая с помощью удерживающего магнита значения усилий  $F_{уд} = F_{нс}$ , можно за счет нагружения двигателя статическим противодействующим усилием в широком диапазоне изменять его начальное тяговое усилие  $F_n$  и энергию удара  $A_y$  [88; 106; 109].

Регулирование энергии удара импульсного ЛЭМД с встроенным устройством удержания возможно как по каналу удержания, то есть за счет изменения усилия удержания при неизменной длительности импульса напряжения, питающего обмотку ЛЭМД, так и по силовому каналу, то есть за счет изменения длительности питающего импульса при  $F_{уд} = \text{const}$ . Практически любое нагружение и значение  $F_n$  можно обеспечить в случае одновременного и согласованного регулирования по обоим каналам.

Следовательно, конструктивное дополнение двигателя устройством удержания благодаря увеличению энергии удара с возможностью ее регулирования позволяет расширить технологические возможности электромагнитного привода

с таким ЛЭМД.

Энергетические характеристики исследуемого импульсного ЛЭМД с устройством УЯ при  $F_{уд} = \text{var}$  и неизменной длительностью питающего импульса определялись экспериментально. Предварительно снималась зависимость усилия  $F_{уд}$  от тока обмотки удержания  $I_y$  при дисковой части 1 якоря (Рисунок 6.4) от магнитопровода 7 с полюсным наконечником 9. Из полученных осциллограмм находились потребляемая от источника энергия  $W_{эл}$  за цикл, ток трогания  $I_{тр}$ , КПД  $\eta$ , а также динамические параметры: время трогания  $t_{тр}$ , движения  $t_{дв}$ , рабочего хода  $t_{рх} = t_{дв} + t_{тр}$ .

Типовые осциллограммы рабочего хода исследуемого ЛЭМД пресса ПЭМ-0,8 для значений  $W_{эл} = 285$  Дж и  $F_{уд} = \text{const}$  приведены в п. 3.2 (Рисунок. 3.5), где сплошные кривые соответствуют усилию удержания  $F_{уд} = 0,58$  кН, пунктирные  $F_{уд} = 0$ . Из них следует, что удержание якоря ЛЭМД на этапе трогания вызывает рост времени трогания и тока трогания.

Анализ осциллограмм позволил оценить влияние усилия  $F_{уд}$  на энергетические характеристики и показатели импульсного ЛЭМД с встроенным устройством удержания при неизменных значениях потребляемой от источника энергии и рабочем ходе якоря. На рисунке. 6.5 представлены зависимости, энергии удара  $A_y$  и КПД  $\eta$  импульсного ЛЭМД типа ПЭМ-0,8 с встроенным устройством удержания для рабочего хода якоря 0,024 м при потребляемой за цикл энергии, равной при однофазном питании  $W_{эл} = 86,6$  Дж (пунктирные линии) и при трехфазном питании  $W_{эл} = 285$  Дж (сплошные линии). Первые из них свидетельствуют о том, что с увеличением усилия  $F_{уд}$  энергия удара и КПД исследуемого ЛЭМД сначала несколько возрастают, после чего падают до нуля, вторые - монотонно возрастают.

В обоих случаях питания возрастание энергии удара на этапе трогания объясняется увеличением запасаемой в магнитном поле рабочих зазоров двигателя начальной магнитной энергии  $W_{мн} = 0,5 \cdot L_n \cdot I_{тр}^2$ . В случае трехфазного питания накопление магнитной энергии продолжается интенсивно и при движении якоря, тогда как в случае однофазного питания уровень накопленной при дви-

жении энергии значительно ниже.

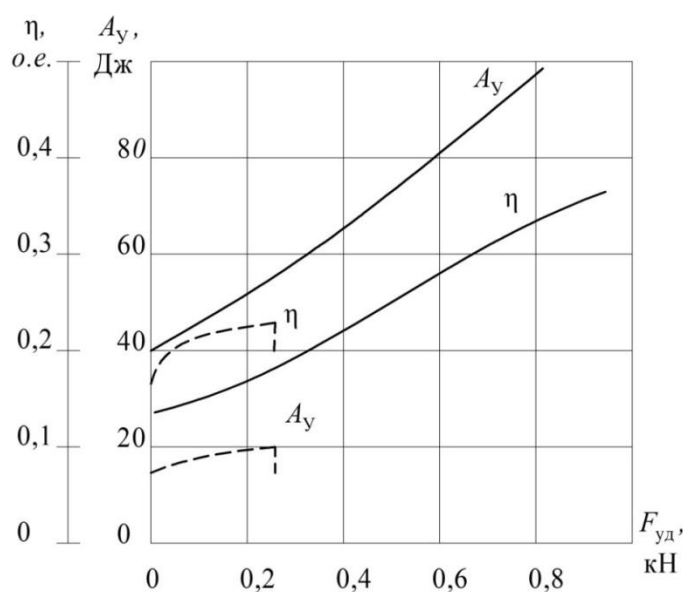


Рисунок 6.5 – Зависимость энергетических показателей  $A_y$  и  $\eta$  ЛЭМД с устройством УЯ от усилия удержания  $F_{уд}$  (сплошные линии – трехфазное питание, пунктирные – однофазное)

Энергия удара определялась с помощью контактного датчика предупредной скорости [166] по формуле  $A_y = 0,5 m_a \cdot l^2 / (T_m)^2$ , где  $l$  – мерный участок пути;  $T_m$  – измеренное время прохождения этого участка.

Оценку влияния устройства УЯ на энергетические характеристики ЛЭМД проведем для трехфазного питания, когда  $W_{эл} = 285$  Дж. По методике работы [167] построены статические магнитные характеристики исследуемого ЛЭМД  $\Psi = f(i, \delta)$  для различных положений якоря.

Линия динамического перехода построена с использованием экспериментальных динамических характеристик ЛЭМД по методике [5]. Для этого по кривой потокосцепления, определяемой из динамических характеристик, и осциллограмме хода якоря определен ряд мгновенных значений потокосцепления и положения якоря для одних и тех же моментов времени. Полученные значения потокосцепления откладывают на оси ординат статических характеристик  $\Psi = f(i, \delta)$  и через найденные точки проводят горизонтальные линии до пересечения со статической магнитной характеристикой, построенной для того рабочего зазора, которому соответствует взятая величина потокосцепления.

На рисунке 3.6 (п. 3.2) представлены экспериментальные энергетические характеристики исследуемого режима работы импульсного ЛЭМД, состоящие из линий динамического перехода и ограничивающих их статических магнитных характеристик, которые соответствуют крайним положениям якоря с рабочими зазорами 1,5 и 25,5 мм.

Пунктирной линией показан магнитный цикл при усилии удержания  $F_{уд} = 0$ , сплошной при  $F_{уд} = 0,58$  кН. Из полученных циклов графическим способом определены энергетические характеристики ЛЭМД типа ПЭМ-0,8: механическая работа  $A$ , магнитный КПД  $\eta_m$ , коэффициент эффективности магнитного цикла  $\eta_{ц}$  и начальная магнитная энергия  $W_{мн}$ , с помощью которых проведено сравнение энергетических режимов для ЛЭМД с устройством УЯ и без него. Результаты расчета указанных характеристик, а также значения энергетических показателей (энергии удара, полезной работы и КПД) ЛЭМД с устройством УЯ и без него приведены в таблице 6.1 и позволяют оценить эффективность применения этого устройства.

Таблица 6.1– Энергетические характеристики и показатели импульсного ЛЭМД с встроенным устройством УЯ и без него

Усилие удержания	Энергетические характеристики и показатели ЛЭМД типа ПЭМ-0,8 при потребляемой за цикл энергии $W_{эл} = 285$ Дж и трехфазном питании					
	Механическая работа $A$ , Дж	Магнитный КПД $\eta_m$	Коэффициент эффективности цикла $\eta_{ц}$	Начальная магнитная энергия $W_{мн}$ , Дж	Энергия удара $A_y$ , Дж	КПД $\eta$ , %
$F_{уд} = 0$	54	0,75	0,48	6,1	40,1	14
$F_{уд} = 0,58$ кН	92	0,85	0,57	33,1	80,5	28

В случае трехфазного питания дополнение двигателя встроенным устройством удержания позволяет повысить такие характеристики и показатели как  $\eta_m$ ,  $\eta_{ц}$  и  $\eta$  соответственно на 10, 11 и 14%, а  $A$ ,  $W_{мн}$  и  $A_y$  – в 1,7; 5,4 и 2 раза. Причем среднее за время движения  $t_{дв}$  значение тягового усилия ЛЭМД растет с ростом усилия  $F_{уд}$  как за счет начального тягового усилия, так и за счет конечного.

При однофазном питании, когда  $W_{эл} = 86,6$  Дж, конечное тяговое усилие ЛЭМД значительно ниже, чем при трехфазном, что обуславливает и низкий уро-

вень среднего значения тягового усилия двигателя и более низкую энергию удара. При дальнейшем росте усилия  $F_{\text{уд}}$  увеличение энергии удара прекращается несмотря на рост начального тягового усилия. Это объясняется уменьшением конечного тягового усилия ЛЭМД вследствие уменьшения его тока, так как длительность питающего обмотку ЛЭМД импульса в этом случае меньше времени рабочего хода и большая часть энергии в ЛЭМД преобразуется при значительных воздушных зазорах и небольших значениях магнитной индукции в них, что неэффективно. Когда усилие  $F_{\text{уд}}$  достигнет и будет превышать значение начального тягового усилия ЛЭМД, его рабочий ход не совершится, энергия удара равна нулю.

Характер изменения КПД (Рисунок 6.5) для обоих случаев близок к характеру изменения энергии удара. Увеличение КПД объясняется следующим. При усилии  $F_{\text{уд}} = 0$  якорь ЛЭМД начинает движение при небольшом тяговом усилии, а двигатель начинает работать в режиме, близком к режиму холостого хода, для которого характерны низкие значения КПД из-за превышения потерь холостого хода над нагрузочными. В работе [9] показано, что импульсные ЛЭМД являются специальными электрическими машинами. Тогда для них, как и для классических электрических машин, потери энергии можно разделить на постоянные (потери холостого хода) и переменные (нагрузочные) [42; 168]. Однако, в отличие от классических, например, асинхронных, потери холостого хода и нагрузочные потери имеют место как в обмотке возбуждения ЛЭМД (в меди), так и в его магнитопроводе (в стали). Потери холостого хода по своему физическому смыслу определяются теми их составляющими в меди и стали, которые связаны с затратами электроэнергии на перемещение якоря с рабочим инструментом без совершения полезной механической работы, когда, в частности,  $A_y = 0$ . Нагрузочные потери определяются теми составляющими потерь в меди и стали, которые связаны с затратами электроэнергии на совершение полезной механической работы.

Поэтому с ростом усилия удержания растут нагрузочные потери, КПД импульсного ЛЭМД также возрастает, достигая максимума, обусловленного равен-

ством потерь холостого хода и нагрузочных потерь в двигателе, а затем убывает. Следовательно, при нагружении импульсного ЛЭМД статическим противодействующим усилием путем увеличения усилия удержания КПД возрастает.

Следует заметить, что, как установлено в [9], процесс запасаения энергии источника в магнитном поле ЛЭМД идет интенсивнее при неподвижном якоре, чем при движущемся, так как противо-ЭДС движения в этом случае равна нулю и не препятствует нарастанию тока и магнитного потока в двигателе. Кроме того, электромагнитная постоянная времени  $\tau_n = L_n/R$  на начальном этапе движения минимальна.

Из рисунка 6.5 и таблицы 6.1 следует, что разработанный нами импульсный ЛЭМД с встроенным устройством удержания якоря при усилии удержания, например,  $F_{уд} = 0,58$  кН, и согласованным регулированием по силовому каналу с неизменной потребляемой энергией  $W_{эл} = 285$  Дж позволяет по сравнению с  $F_{уд} = 0$  увеличить энергию удара с 40,1 до 80,5 Дж и КПД импульсного ЛЭМД с 14 до 28%. Очевидно, что с ростом усилия удержания  $F_{уд} > 0,58$  кН возможно дальнейшее повышение КПД двигателя и его удельной энергии удара. В работе [9] обоснован диапазон регулирования усилия удержания, равный  $(0,5...1,0) F_n$ , где  $F_n$  – начальное тяговое усилие ЛЭМД, определяемое из его тяговых характеристик [102].

Выбор конкретного значения усилия удержания должен производиться с учетом величины потерь в двигателе за время подачи на его обмотку импульса напряжения питания, равного времени рабочего хода якоря, и заданного значения энергии удара, то есть при условии максимального КПД импульсного ЛЭМД. Это вызывает необходимость создания замкнутой системы экстремального по КПД регулирования электромагнитным приводом, что является предметом дальнейших исследований.

Проведенные испытания показали, что исследуемый импульсный ЛЭМД с устройством удержания якоря обладает широкими технологическими возможностями и имеет удельную энергию удара, достигающую 9 Дж/кг.



## 6.2 Способ передачи дополнительной магнитной энергии в рабочие зазоры импульсного ЛЭМД

В главах 3 и 4 было установлено, что эффективность энергопреобразования в импульсных ЛЭМД зависит от режимных и конструктивных параметров. Установлено, что к режимам, обеспечивающим наибольшую энергетическую эффективность, относятся режимы с неизменным или мало меняющимся по ходу якоря потокосцеплением.

Дальнейшее повышение энергетических показателей при известной конструкции магнитной системы двигателя достигается путем совершенствования системы его возбуждения. Функционирование импульсного ЛЭМД по энергетическому режиму 2 ( $\Psi = \text{const}$ ) дает возможность двигателю обеспечить механическую работу при максимальном магнитном КПД. Из анализа потерь в таком режиме следует, что при повышении тока трогания возрастает концентрация магнитной энергии, аккумулируемой в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД, и при этом можно получить бóльшую механическую работу за цикл. Известно, что в импульсных ЛЭМД кроме рабочих зазоров существуют еще и нерабочие, в которых так же запасается магнитная энергия, обусловленная потоками рассеяния, и ее целесообразно использовать полезно.

В разделе 4.6 в выражениях (4.80)-(4.83) получены расчетные значения КПД двигателя с учетом потерь в обмотке возбуждения, среди них:

$$\eta = \frac{1}{1 + Q/A},$$

где  $Q = R \int_0^{t_{\text{вкл}}} i^2 dt$  – потери энергии в обмотке за цикл.

Для режима 2 это соотношение с учетом выражения, связывающего коэффициент эффективности цикла  $\eta_{\text{ц}}$ , механическую работу  $A$  и ее предельное значение  $A_{\text{п}}$  [136], примет вид:

$$\eta = 1 / \left( 1 + \frac{2 \cdot t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{H}}}{k_{\text{а}}^2 \cdot (1 - 1/m)} \right),$$

где  $t_{\text{вкл}}$  - время включения двигателя;  $k_a$  - коэффициент амплитуды импульса тока обмотки;  $\tau_H$  - электромагнитная постоянная времени двигателя на этапе трогания.

Потери на активном сопротивлении обмотки достигают 25-50% от величины механической работы [9]. Для увеличения энергетических показателей импульсного ЛЭМД с устройством удержания якоря предлагается использовать магнитную энергию, связанную с полями рассеяния магнитной системы двигателя, как, например, в работах [100; 116; 117], а также магнитную энергию, сосредоточенную в магнитной системе устройства удержания якоря. Как показали исследования [74], эти энергии возможно перераспределить в рабочие зазоры для преобразования их в механическую работу, соединив последовательно обмотки возбуждения и удержания и зашунтировав их диодом [127; 128; 169] (Рисунок 6.6).

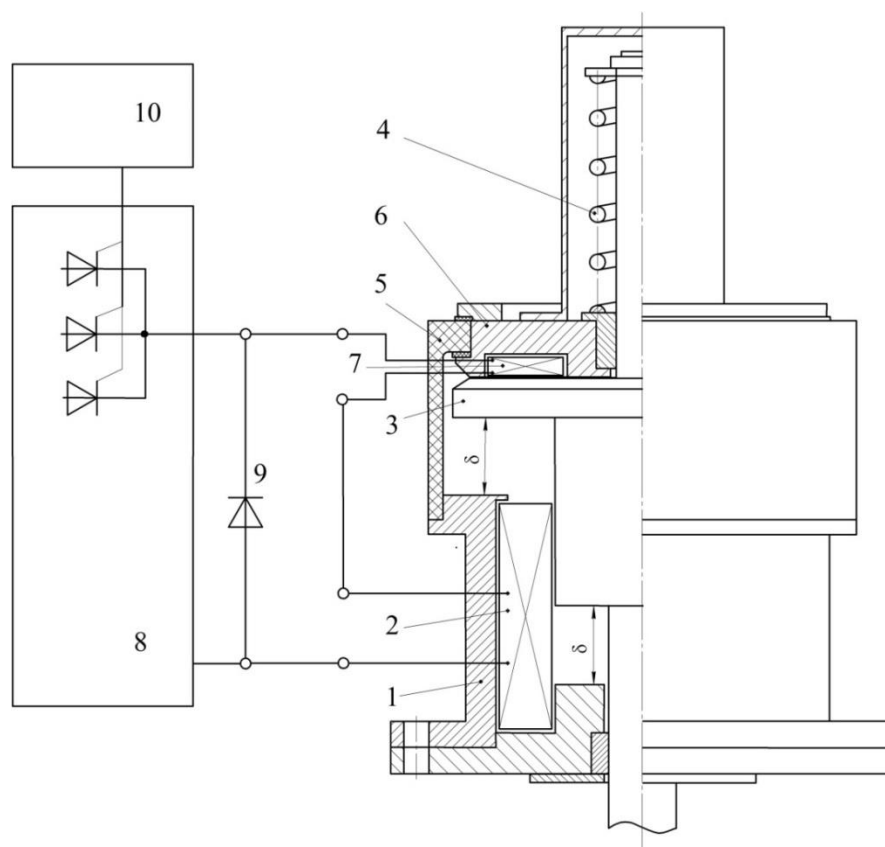


Рисунок 6.6 – Схема последовательного включения обмоток ЛЭМД

Импульсный электромагнитный привод (Рисунок 6.6) состоит из линейного электромагнитного двигателя с устройством удержания якоря, содержащего

цилиндрический статор 1 с обмоткой возбуждения 2, комбинированный якорь с плоской дисковой частью 3, возвратную пружину 4, направляющий корпус 5, и устройства питания 8 и управления 10 с шунтирующим диодом 9. Устройство удержания якоря выполнено в виде цилиндрического электромагнита с магнитопроводом 6, обмоткой удержания 7 и внешним притягивающимся якорем, роль которого выполняет плоская дисковая часть комбинированного якоря. Обмотка возбуждения и обмотка удержания включены последовательно и шунтированы диодом, а возвратная пружина имеет предварительное поджатие.

Выполнение возвратной пружины с предварительным поджатием в исходном положении якоря приводит к соприкосновению плоской части комбинированного якоря с магнитопроводом устройства удержания. Благодаря этому при появлении и возрастании тока от источника питания через последовательно соединенные обмотки возбуждения и удержания возникает удерживающее якорь усилие, превышающее тяговое усилие. Одновременно с возрастанием тока при неподвижном якоре происходит накопление магнитной энергии  $W_m$  в рабочих зазорах электромагнитного двигателя и дополнительной магнитной энергии  $W_{m,доп}$  в зазорах устройства удержания якоря.

При движении на интервале шунтирования диодом последовательно соединенных обмоток возбуждения и удержания, когда от источника питания уже нет притока энергии в магнитное поле рабочих зазоров двигателя, часть энергии магнитного поля  $W_{m,доп}$  устройства удержания при снижении тока обмотки дополнительно передается в энергию магнитного поля рабочих зазоров  $W_m$  электромагнитного двигателя, что приводит к повышению среднего значения тягового усилия  $F(t)$ , пропорционального уменьшению магнитной энергии рабочего зазора при его перемещении  $x$ :

$$F(t) = \frac{\partial(W_m + W_{m,доп})}{\partial x},$$

где  $W_m$  – энергия магнитного поля в рабочих зазорах электромагнитного двигателя;  $W_{m,доп}$  – часть энергии магнитного поля устройства удержания, дополни-

тельно передаваемая в энергию магнитного поля рабочих зазоров;  $F(t)$  – среднее тяговое усилие на интервале шунтирования.

Таким образом, применение возвратной пружины с предварительным поджатием, последовательное соединение обмоток возбуждения и удержания и их шунтирование диодом приводит к повышению среднего тягового усилия на интервале шунтирования.

Устройство управления задает длительность открытого состояния управляемого выпрямителя устройства питания. В момент времени  $t=0$  ( $t_0$ ) устройством 10 подается сигнал включения управляемого выпрямителя 8, через который источник питания подключается к последовательно соединенным обмоткам удержания и возбуждения. Ток в этих обмотках при неподвижном якоре возрастает от нуля в соответствии с выражением при среднем значении выпрямленного напряжения  $U$ :

$$i = I_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{эКВ}}} \right) = \frac{U}{R + R_{уд}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{эКВ}}} \right),$$

где  $T_{эКВ} = \frac{L_H + L_{уд.макс}}{R + R_{уд}}$  – электромагнитная постоянная времени цепи обмоток;

$L_H$ ,  $R$ ,  $L_{уд.макс}$ ,  $R_{уд}$  – соответственно начальная индуктивность и сопротивление обмотки возбуждения и максимальная индуктивность и сопротивление обмотки удержания;  $I_{уст}$  – установившийся ток в цепи обмоток.

С ростом тока в цепи обмоток тяговое усилие верхнего  $F_{\delta.в}$  и нижнего  $F_{\delta.н}$  рабочих зазоров и усилие удержания  $F_{уд}$  начинают возрастать. Эти усилия выразим с помощью формулы Максвелла (на один зазор) [9].

Тяговое усилие  $F_T$  определяется магнитным потоком  $\Phi$  через начальный рабочий зазор  $\delta$  и площадью распределения  $S_\delta$  этого потока:

$$F_T(t) = F_{\delta.в} = F_{\delta.н} = \frac{\Phi^2(t)}{2\mu_0 \cdot S_\delta} = \frac{[w \cdot i(t)]^2 \cdot \mu_0 \cdot S_\delta}{2\delta^2}, \quad (6.19)$$

где  $w \cdot i(t)$  – МДС обмотки возбуждения;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ .

Усилие удержания  $F_{уд}$  определяется магнитным потоком  $\Phi_{уд}$  через началь-

ный воздушный зазор  $\delta_{в.0}$  (на рисунке 6.6 показан утолщенной линией), образованный поверхностью сопряжения ярма 6 электромагнита удержания и плоской дисковой части якоря 3, и площадью распределения  $S_{уд}$  этого потока:

$$F_{уд}(t) = \frac{\Phi_{уд}^2(t)}{2\mu_0 \cdot S_{уд}} = \frac{[w_{уд} \cdot i(t)]^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{уд}}{2\delta_{в.0}^2}, \quad (6.20)$$

где  $w_{уд} \cdot i(t)$  – МДС обмотки удержания. В выражениях (6.19) и (6.20)  $w$  и  $w_{уд}$  – числа витков обмотки возбуждения и обмотки удержания.

Так как МДС обмотки возбуждения всегда больше, чем МДС обмотки удержания, то согласно (6.19) и (6.20) с ростом тока скорость роста тягового усилия во времени будет выше скорости роста усилия удержания. Однако на этапе трогания якоря из-за разницы начальных зазоров  $\delta$  и  $\delta_{в.0}$  в исходном положении за счет предварительного поджатия возвратной пружины 4 абсолютные значения усилия удержания будут пока превышать абсолютные значения тягового усилия двигателя. Это объясняется весьма значительной разницей начальных зазоров, когда в выражениях (6.19) и (6.20) их отношение  $\delta/\delta_{в.0} = 100 \dots 200$ .

Движение якоря начнется с некоторой временной задержкой в момент времени  $t_1$  (Рисунок 6.7), когда возрастающее тяговое усилие двигателя превысит по величине возрастающее с меньшей интенсивностью усилие удержания якоря.

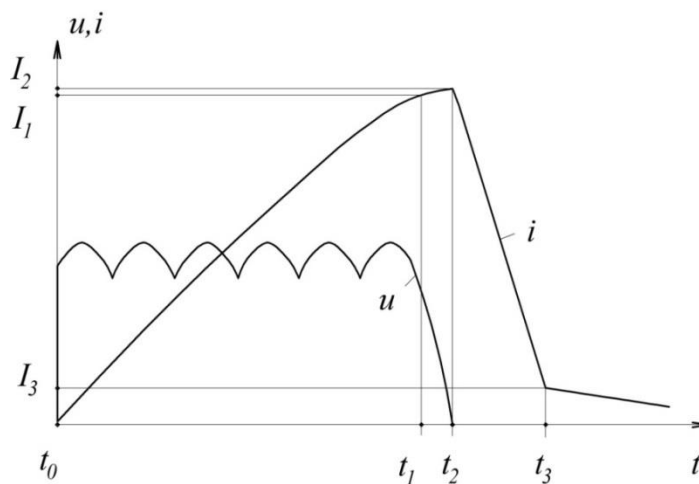


Рисунок 6.7 – Временные диаграммы напряжения и тока импульсного ЛЭМД

К моменту времени  $t_2$  ток несколько возрастет до максимального значения

$I_2$ , а в магнитной системе устройства удержания якоря будет накоплена магнитная энергия:

$$W_{\text{м.уд2}} = L_{\text{уд.макс}} \cdot I_2^2 / 2,$$

где  $W_{\text{м.уд2}}$  – энергия магнитного поля устройства удержания, соответствующая максимальному значению тока  $I_2$ ;  $L_{\text{уд.макс}}$  – максимальная индуктивность обмотки удержания.

Кроме того, к моменту времени  $t_2$  в магнитной системе самого двигателя будет накоплена основная часть магнитной энергии – энергия магнитного поля  $W_{\text{м.д2}}$ , соответствующая максимальному значению тока  $I_2$ :

$$W_{\text{м.д2}} = L_{\text{н}} \cdot I_2^2 / 2,$$

где  $L_{\text{н}}$  – начальная индуктивность обмотки возбуждения, которая значительно больше максимальной индуктивности  $L_{\text{уд.макс}}$  обмотки удержания.

С момента времени  $t_2$  ток обмоток возбуждения и удержания (Рисунок 6.7) замыкается через диод, а сам контур обмоток оказывается отключенным от источника. При движении якоря рабочий зазор между статором и якорем уменьшается, и совершается механическая работа за счет расходования ранее накопленной магнитной энергии не только рабочих зазоров двигателя, но и магнитной энергии, обусловленной потоками рассеяния. При этом индуктивность обмотки возбуждения увеличивается, противо-ЭДС движения возрастает, а ток – уменьшается. Дополнительно на интервале  $t_2 \dots t_3$  шунтирования диодом 9 ток уменьшается из-за потерь энергии на активных сопротивлениях обмоток возбуждения

и удержания  $\Delta W_{\text{R}} = \int_{t_2}^{t_3} (R + R_{\text{уд}}) \cdot i^2(t) dt$ . В момент времени  $t_3$  полностью выбира-

ется зазор между якорем и статором, а ток падает до значения  $I_3$ , и далее механическая энергия двигателя становится равной нулю.

При наличии последовательно соединенных и замкнутых между собой через диод обмоток возбуждения и удержания часть магнитной энергии, запасенной в магнитных системах как самого двигателя, так и устройства удержания к

моменту времени  $t_2$ , при уменьшении тока от  $I_2$  до  $I_3$  на интервале шунтирования диодом, перераспределяется в дополнительную энергию магнитного поля рабочих зазоров двигателя, а затем преобразуется в дополнительную механическую энергию. Если бы индуктивность обмотки удержания к моменту времени  $t_2$  оставалась неизменной, то эта прибавка магнитной энергии за счет устройства удержания определилась как

$$W'_{\text{м.доп}} = L_{\text{уд.макс}} \cdot I_1^2 / 2 - L_{\text{уд.макс}} \cdot I_2^2 / 2. \quad (6.21)$$

Однако при движении якоря на интервале времени  $t_1 - t_2$  воздушный зазор между ярмом 6 и плоской дисковой частью якоря 3 увеличивается на величину рабочего хода и к моменту  $t_2$  достигает значения  $\delta$ , что приводит к уменьшению индуктивности обмотки удержания от максимальной величины  $L_{\text{уд.макс}}$ , соответствующей исходному состоянию якоря, до минимальной величины  $L_{\text{уд.мин}}$ , соответствующей конечному состоянию. Тогда выражение прибавки магнитной энергии для конечного состояния, соответствующего моменту времени  $t_2$ , примет вид:

$$W_{\text{м.доп}} = L_{\text{уд.макс}} \cdot I_1^2 / 2 - L_{\text{уд.мин}} \cdot I_2^2 / 2. \quad (6.22)$$

Сравнивая (6.21) и (6.22), нетрудно видеть, что прибавка магнитной энергии, дополнительно вводимой на интервале времени  $t_1 - t_2$  в магнитное поле рабочих зазоров двигателя, когда нет притока энергии в это поле от источника питания, даже возросла.

Таким образом, в преобразовании энергии магнитного поля в механическую энергию участвует больше энергии, чем ее запасено к моменту  $t_1$  в магнитном поле рабочих зазоров двигателя, на величину энергии  $W_{\text{м.доп}}$ .

Включение обмотки удержания последовательно с обмоткой возбуждения позволит за счет увеличения интервала времени  $t_0 - t_2$  (Рисунок 6.7) накопить в магнитных системах двигателя и устройства удержания необходимое количество магнитной энергии при сравнительно невысоком напряжении источника питания. Это дает возможность не прибегать к режиму форсировки и обойтись без шихтования магнитопровода.

Запасить магнитную энергию и затем передать ее рассмотренным выше способом в магнитное поле рабочих зазоров возможно и с помощью дросселя, конструктивно не связанного с электромагнитным двигателем [100; 117]. Однако лишь использование в конструкции двигателя встроенного в него устройства удержания якоря позволит накопить в рабочих зазорах двигателя значительное количество магнитной энергии. Без устройства удержания якоря накопить значительное количество магнитной энергии  $W_m$  возможно лишь с помощью подачи на обмотки повышенного в несколько раз (форсированного) напряжения. Но при этом, как известно, возрастут потери в магнитопроводе от вихревых токов и снизится коэффициент преобразования потребляемой двигателем энергии источника питания в механическую энергию якоря. В предлагаемом способе перераспределения энергии роль дросселя органично выполняет устройство УЯ, встроенное в конструкцию двигателя.

Кроме того, имеется возможность уменьшить площадь окна под обмотку 2 в расточке статора 1 (Рисунок 6.6). При этом значение плотности тока в обмотке возбуждения увеличится, возрастут потери на ее активном сопротивлении, но они будут скомпенсированы, как и в работе [117], притоком энергии в магнитное поле рабочих зазоров из магнитного поля устройства удержания. Уменьшение площади окна обмотки возбуждения при заданных габаритных размерах двигателя позволит увеличить площадь взаимодействующих поверхностей двигателя и за счет этого увеличить тяговое усилие дополнительно к описанному выше эффекту перераспределения как магнитной энергии устройства удержания, так и магнитной энергии, связанной с потоками рассеяния двигателя, в энергию магнитного поля рабочих зазоров.

Картина поля при моделировании импульсного ЛЭМД пресса ПЭМ-0,8 с устройством УЯ при последовательном соединении обмоток возбуждения и удержания и шунтировании их диодом представлена на рисунке 6.8.

На основе численного эксперимента определены запасы магнитной энергии в магнитных системах как самого двигателя пресса ПЭМ-0,8, так и устройства удержания якоря с известными геометрическими параметрами [73; 74].



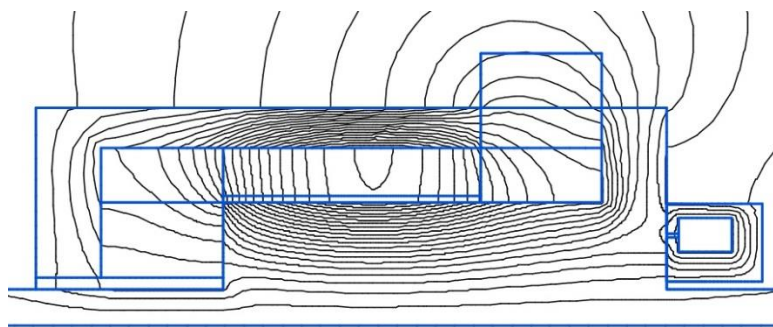


Рисунок 6.8 – Картина магнитного поля импульсного ЛЭМД с устройством удержания якоря при последовательном соединении обмоток возбуждения и удержания

При использовании магнитной энергии, связанной с потоками рассеяния двигателя, результаты моделирования показали возможность увеличения механической работы двигателя на 30...35 %, а при использовании магнитной энергии устройства удержания якоря для такого среднеходового электромагнитного двигателя – возможность увеличения его механической работы еще на 1...1,5%, а для короткоходового двигателя – на 4...6%.

Увеличение среднего значения тягового усилия электромагнитного двигателя, развиваемого на интервале шунтирования диодом последовательно соединенных обмоток возбуждения и удержания, увеличивает КПД двигателя и повышает эффективность работы привода.

Таким образом, удалось увеличить механическую энергию рабочего хода за счет перераспределения значительной части магнитной энергии, связанной с полями рассеяния импульсного ЛЭМД и устройства удержания якоря, которая, преобразуясь в тепло, бесполезно теряется, в энергию магнитного поля рабочих зазоров двигателя.

### 6.3 Рабочие процессы в импульсном ЛЭМД при рекуперации энергии в питающую сеть

Анализ рабочих процессов импульсных ЛЭМД при питании их от однофазной промышленной сети показывает, что питание и управление в этом случае возможно для ЛЭМД с энергией удара до 10 – 12 Дж [99; 170]. Для более

крупных машин время рабочего хода превышает полупериод напряжения источника, и якорь таких ЛЭМД в заключительной фазе своего хода движется при отсутствии электромагнитного усилия. Так, при питании двигателя прессы ПЭМ-0,8 (усилием 8 кН) и энергией удара 18 Дж от однофазного устройства питания и управления УПУ-1 [116; 170-173] с углом управления 35 эл. град. ускорение якоря происходит на первой половине рабочего хода, остальную часть хода якорь движется по инерции, расходуя накопленную кинетическую энергию на деформацию возвратной пружины. Энергия удара при этом составляла 8,1 Дж при КПД, равном 11,2%. От источника за один цикл при этом потреблялось 85,1 Дж, преобразовывалось 72,5 Дж и рекуперировалось в источник в виде обратного потока энергии 12,6 Дж [99]. Следовательно, поступающая из сети электромагнитная энергия в ЛЭМД использовалась нерационально.

Из рассмотренных в [99] и главе 4 условий преобразования электромагнитной энергии ЛЭМД следует, что для рационального использования магнитной энергии рабочих зазоров необходимо снизить или исключить ее обратный поток. Включение обратного диода параллельно обмотке ЛЭМД в УПУ-1 согласно п. 6.2 позволяет снизить величину обратного потока электромагнитной энергии двигателя за счёт устранения электрической связи с источником и увеличить долю магнитной энергии, преобразуемую в механическую [99; 170]. Включение тиристора VS2 вместо обратного диода (Рисунок 6.9) позволяет получить промежуточные значения обратного потока преобразуемой электромагнитной энергии путем, например, амплитудного регулирования тиристора VS2 (изменением напряжения его включения), следовательно, помимо тиристора в составе УПУ-1 осуществить регулирование энергии удара.

Типичные осциллограммы рабочего хода ЛЭМД типа ПЭМ-0,8 (Рисунок 6.10) отражают напряжение  $u_d$  на двигателе, токи двигателя  $i_d$ , потребляемый от источника  $i_{ист}$  и обратного тиристора  $i_{обр}$ , а также перемещение  $\delta$  якоря. Если обратный тиристор VS2 работает в режиме обратного диода (сплошные линии), то время рабочего хода ЛЭМД минимально, а энергия удара наибольшая. Пунктирными линиями показаны осциллограммы при закрытом тиристоре VS2

(без обратного диода). Динамические характеристики при углах управления тиристора VS2, отличных от нуля, будут промежуточными и на рисунке 6.10 не показаны.

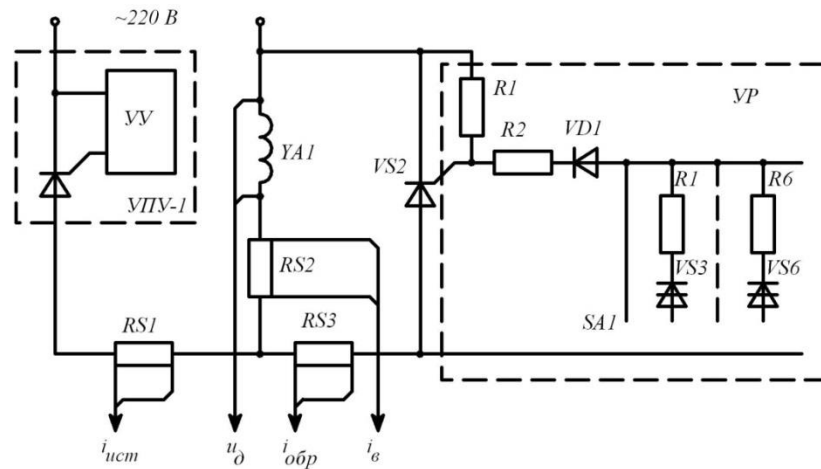


Рисунок 6.9 – Электрическая схема экспериментальной установки

Эффективность использования электромагнитной энергии в ЛЭМД с устройством питания (Рисунок 6.9) отразим с помощью магнитных циклов (энергетических диаграмм).

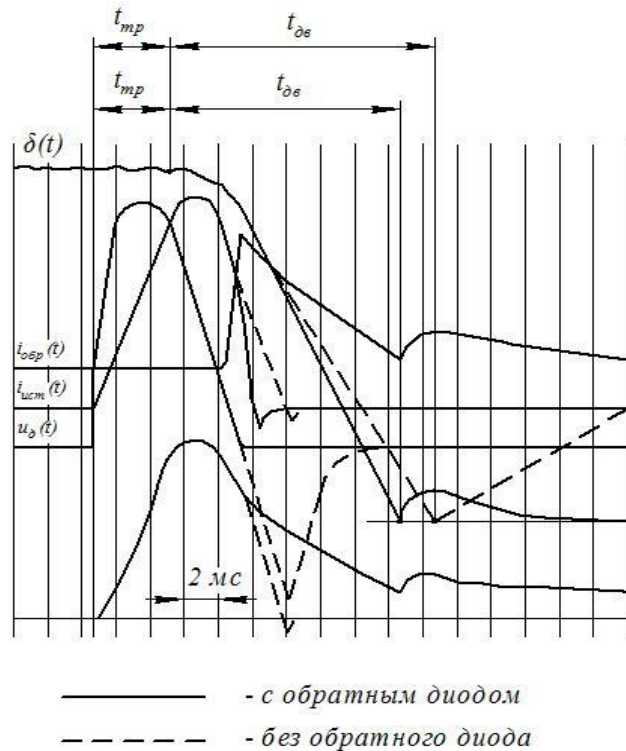


Рисунок 6.10. Динамические характеристики рабочих процессов ЛЭМД прессы ПЭМ-0,8

На рисунке 6.11 изображены энергетические диаграммы ЛЭМД пресса ПЭМ-0,8 при его питании от однофазного устройства УПУ-1 с углами управления  $\alpha = 35$  эл. град. и  $\alpha = 0$ , построенные по осциллограммам рабочего процесса и статическим магнитным характеристикам ЛЭМД согласно [5]. Пунктирными линиями показан магнитный цикл  $OABCEO$  при закрытом тиристоре  $VS2$ , сплошными – цикл  $OABCDEO$  при включенном тиристоре  $VS2$  в режиме диода.

Началу движения якоря соответствует точка  $A$  на кривой начального потокосцепления  $\psi_n$  (Рисунок 6.11). Рабочая точка, двигаясь из т.  $A$  до точки  $B$ , проходит последовательно энергетические режимы от 7 до режима 2. А на протяжении движения от т.  $B$  до т.  $C$  находится в режиме 1, где происходит процесс рекуперации магнитной энергии в источник при одновременном преобразовании её в механическую работу. На участке  $BC$  магнитного цикла вследствие быстрого уменьшения напряжения источника происходит интенсивная рекуперация энергии в источник питания и снижение потокосцепления ЛЭМД за счет резкого уменьшения тока и магнитного потока. В результате наблюдается снижение механической работы (незаштрихованная площадь  $OABCEO$ ).

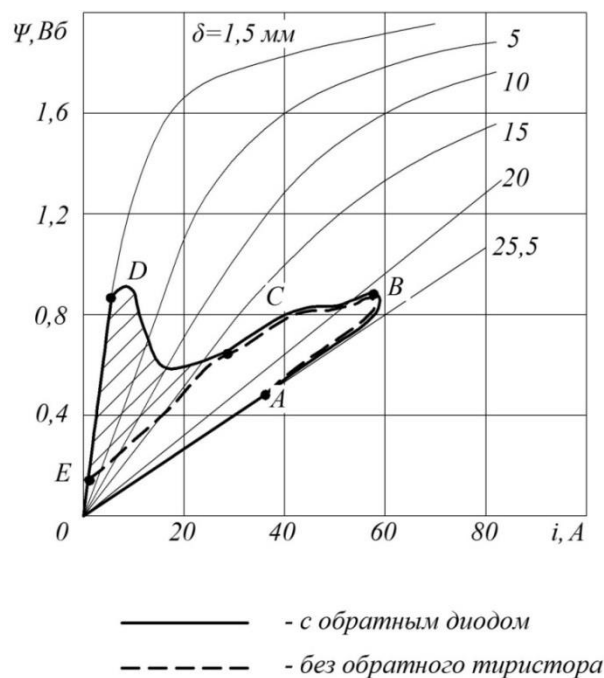


Рисунок 6.11 – Энергетическая диаграмма импульсного ЛЭМД пресса ПЭМ-0,8

В точке *C* происходит прекращение рекуперации магнитной энергии в источник (это соответствует переходу состояния системы «потокосцепление-ток» от режима 1 к режиму 2) и продолжается преобразование магнитной энергии только в механическую работу (режимы 3...5). Момент прекращения рекуперации определяется моментом включения обратного тиристора *VS2* под действием обратного (отрицательного) напряжения источника и последующего отключения тиристора *VS1*. Заштрихованная площадь *ECDE* соответствует приращению механической работы за счет не успевшей рекуперировать в источник магнитной энергии, накопленной в рабочих зазорах.

Магнитный КПД для цикла *OABCEO* (без обратного диода) близок к единице, так как остаточная магнитная энергия, определяемая точкой *E*, мала. Однако общий КПД двигателя низок и равен 11,2% из-за того, что преобразование электромагнитной энергии в механическую работу происходит на большей части рабочего хода ЛЭМД в энергетическом режиме 1 при относительно больших рабочих зазорах. Площадь этого цикла, пропорциональная механической работе *A*, мала, что экспериментально подтверждается невысокой энергией удара ( $A_y = 8,1$  Дж).

Включение параллельно обмотке ЛЭМД обратного тиристора позволяет увеличить длительность импульса тока в ней и использовать устройства типа УПУ-1 по однополупериодной однофазной схеме для питания и управления более мощными ЛЭМД, например, пресса типа ПЭМ-1,0 (усилием до 10 кН). Аналогичные УПУ, но выполненные без обратного тиристора или диода, могут быть использованы только для ЛЭМД пресса типа ПЭМ-0,5 (усилием до 5 кН). Использование обратного тиристора в данном УПУ повышает энергию удара и расширяет диапазон её регулирования, так как он определяется выбором момента включения как основного *VS1*, так и обратного *VS2* тириستоров. На практике вместо обратного тиристора обычно используют диод. Магнитный цикл для этого случая *OABCDEO* обладает наибольшей площадью, а ЛЭМД – наибольшей энергией удара, которая равна  $A_y = 16,2$  Дж, и КПД  $\eta = 19\%$ . В целом оба цикла характеризуются низким использованием магнитных материалов двигателя

пресса типа ПЭМ-0,8 при питании его от одной полуволны напряжения источника и небольшой удельной энергией, равной 2 Дж/кг. Особенностью режима работы ЛЭМД с УПУ с обратным диодом является сохранение тока в обмотке после совершения удара, что может быть полезно использовано при реализации технологических операций с прижимом рабочего инструмента. Недостаток такого режима – медленное спадание тока из-за значительной электромагнитной постоянной времени, что вызывает рост времени обратного хода якоря двигателя на 10-50% и снижает его максимальную частоту ходов.

Таким образом, целесообразность применения обратного диода неоднозначна. Если приоритет отдается энергетическим показателям и не существует ограничений на частотные свойства оборудования с ЛЭМД, а также по условиям технологического процесса требуется прижим рабочего инструмента, то наличие обратного диода оправдано. Если импульсный ЛЭМД работает в режиме непрерывных ходов с частотой 300 мин<sup>-1</sup> и выше, то применение обратного диода нежелательно. Это связано с необходимостью уменьшения затрат энергии на возврат якоря, когда в однообмоточных ЛЭМД возможно использовать энергию отскока для совершения обратного хода. К достоинствам обратного диода следует также отнести обеспечение надежной коммутации тиристорных УПУ. Для ускорения гашения остаточной магнитной энергии ЛЭМД последовательно с диодом включают резистор.

#### **6.4 Распределение потерь энергии в импульсных ЛЭМД линейных машин**

Существенной особенностью работы машин с импульсными ЛЭМД являются повышенные по сравнению с традиционными электрическими машинами электромагнитные нагрузки (плотность тока, магнитная индукция) вследствие значительного воздушного зазора. Указанные нагрузки определяют величину выходных параметров (энергию и частоту ударов). Это в свою очередь приводит к тому, что удельные потери энергии в ЛЭМД оказываются значительно выше,

чем у электрических двигателей вращательного движения.

Потери энергии в импульсных ЛЭМД играют особую роль, так как отражают не только эффективность электромеханического преобразования энергии, но и определяют режим работы в составе привода, как правило, повторно-кратковременный или кратковременный.

Зависимость мощности потерь  $\Delta P$  от КПД  $\eta$  импульсных ЛЭМД выражается известным уравнением для непрерывных ходов [3; 174]:

$$\Delta P = P \cdot \left( \frac{1 - \eta}{\eta} \right),$$

где  $P = (A \cdot n) / 60$  – полезная мощность;  $A$  – механическая работа за цикл;  $n$  – число ходов в минуту.

Гиперболический характер этой зависимости (Рисунок 6.12), представленный в виде графика  $\Delta P / P = f(\eta)$ , свидетельствует о резком увеличении потерь при снижении КПД.

На основании экспериментальных данных и производственных испытаний машин с электромагнитным приводом (Рисунок 6.12) выделим зоны для отдельных групп машин.

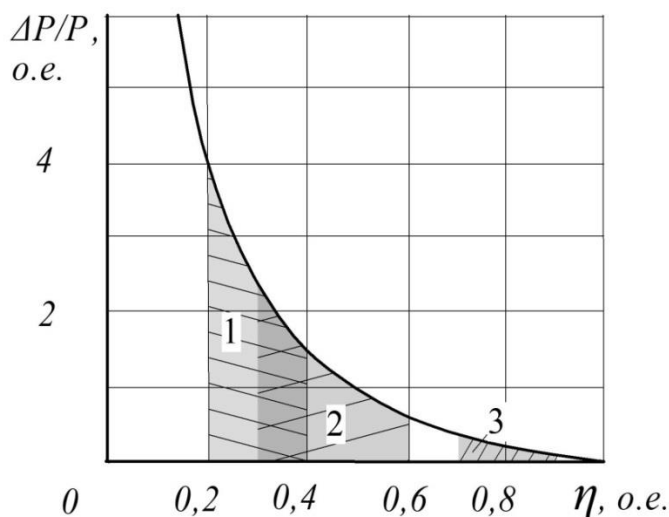


Рисунок. 6.12 – Изменение отношения мощности потерь в двигателе к его полезной мощности в зависимости от КПД: область 1 – мощные редкоударные машины с ЛЭМД; область 2 – частоударные машины малой и средней мощности с ЛЭМД; область 3 – вращающиеся электрические машины

Если в зоне КПД вращающихся электрических машин доля потерь  $\Delta P / P$  составляет 0,1...0,15 (область 3), то для редкоударных мощных машин (электромагнитные молоты) она в 5...7 раз выше (область 1), а для частоударных машин малой и средней мощности (электромагнитные прессы, сейсмоисточники, ручные ударные машины) выше в 2...5 раз (область 2). Для ряда импульсных электромагнитных машин с шихтованным магнитопроводом (сейсмоисточники, насосы) уровни потерь соизмеримы с таковыми у электрических двигателей вращательного движения [11; 96; 117; 175].

Для одно- и редкоударных машин с импульсными ЛЭМД целесообразно пользоваться формулой связи КПД с соответствующими энергиями за единичное срабатывание (цикл):

$$\Delta A = A \cdot \left( \frac{1 - \eta}{\eta} \right),$$

где  $\Delta A$ ,  $A$  – соответственно энергия потерь и полезная механическая энергия (работа) за время цикла.

Для совершенствования энергетических показателей таких двигателей в приводе импульсных машин необходимо знать не только общие потери двигателя, но и потери в каждой из его подсистем: электрической, магнитной, механической. С этой целью рассмотрены энергетические диаграммы линейных машин с импульсными ЛЭМД, полученные по результатам лабораторных и производственных испытаний [9; 176-178].

В двухобмоточном электромагнитном молоте с энергией удара 2 кДж и частотой ударов 2 Гц при КПД 25 % потери составляют: в обмотках – 43 %, в стали – 14,5 %, на трение – 10,5 %, обусловленные динамическим торможением – 7 % [176].

В передвижном однообмоточном электромагнитном молоте с энергией удара до 500 Дж, частотой удара до 10 Гц при КПД 26...34% потери в обмотке составляют 46...49 %, в стали – 3...6 %, на противодействующие усилия – 13...15 %, остальные потери (механические, гашения поля и др.) – 4 % [177].

В электромагнитных прессах усилием до 30 кН и частотой ходов до 15 Гц,



использующих приводные линейные однообмоточные электромагнитные двигатели, при КПД 20...38 % потери в обмотке составляют 44...50 %, в стали и механические – 10...14 %, на противодействующие усилия – 5...13 %, остальные потери (механические, гашения поля и др.) – 3 % [9].

В электромагнитных однообмоточных молотках с энергией удара 4,5 Дж и частотой ударов 25 Гц при КПД 31...35 % потери составляют: в обмотке – 45...49 %, остальные виды потерь (механические, электромагнитное торможение, в стали) – 20 % [178].

Анализ распределения энергии в приводных электромагнитах постоянного тока вакуумных контакторов опытной серии КТ 11 [179] показал, что при полезной энергии 2...6,9 %, затрачиваемой на передвижение подвижных частей, потери энергии в обмотке, стали и механические составляют 41...48 %. Запас энергии в электромагнитах (33...56 %) связан в основном с индуктивностью систем и кинетической энергией подвижных масс. Практически эта энергия, в конечном счете, представляет потери. Полная механическая энергия составляет 13...30 %, кинетическая энергия – 6...17 %. Из всей механической энергии полезная энергия, используемая на перемещение подвижных частей контактора, составляет 11...51 %, тогда как кинетическая энергия удара якоря о сердечник составляет от 48 до 90 %. Если оценивать данный электромеханический преобразователь по КПД, считая полезной энергией работу по перемещению подвижных частей контактора, то его значение лежит в диапазоне 2...7 % в зависимости от массогабаритных показателей электромагнитов. Если оценивать этот же преобразователь как ударный механизм, то его КПД изменяется в диапазоне 6...17 %. При оценке данного электромеханического преобразователя по полной механической энергии КПД изменяется от 13 до 30 %.

Проведенный анализ показал, что распределение электрической энергии источника на составляющие в электромагнитном приводе импульсных рабочих машин и коммутационных аппаратов различно. В импульсных ЛЭМД под полезной энергией на выходе понимают запас кинетической энергии, преобразующейся в полезную энергию удара, в отличие от тяговых или толкающих и других

приводных механизмов, где энергию удара при выполнении необходимой работы механизмом стремятся свести к минимуму.

Это отражает соотношение между КПД и потерями для существующих электромагнитных машин (Рисунок 6.12). Однако, как показано в главе 3, в импульсных ЛЭМД за счет увеличенного объема рабочих зазоров по сравнению с классическими электрическими машинами можно значительно увеличить запасаемую в рабочих зазорах магнитную энергию. А при надлежащей организации энергопреобразования магнитной энергии, как показано в главе 4, возможно существенно повысить как механическую работу, так и магнитный КПД, следовательно, и общий КПД энергопреобразования. Достигается это повышение как за счет статического (п. 6.1), так и за счет динамического (п. 4.1) нагружения импульсного ЛЭМД. Статическое нагружение осуществляется как с помощью ФНК, когда магнитная энергия запасается в одном рабочем зазоре двухзазорного ЛЭМД, так и с помощью специальной обмотки удержания, когда магнитная энергия запасается в обоих рабочих зазорах. Последний случай позволит обеспечить ввод дополнительной магнитной энергии нерабочих воздушных зазоров путем шунтирования диодом обмоток возбуждения и удержания [127; 128; 169].

### **6.5 Продолжительность включения импульсного ЛЭМД в приводе технологического оборудования**

Импульсные ЛЭМД в приводе технологического оборудования работают в режимах одиночных ходов (единичный цикл, включающий в себя рабочий и холостой ходы), непрерывных ходов и серии ходов. Режимы непрерывных ходов и серии ходов имеют различные значения времени паузы  $t_{\text{п}}$ , изменяемые от  $t_{\text{п}} = 0$  до задаваемого технологическим процессом времени ожидания очередного срабатывания.

В частоударных электромагнитных машинах (молотках, перфораторах, вибраторах), приводимых в движение импульсными ЛЭМД, время работы электромагнитной машины  $t_{\text{рп}}$  представляет, как правило, пакет временных импуль-

сов, поскольку эти машины питаются импульсами электрического напряжения и генерируют ударные импульсы. Определяют продолжительность включения двигателя в этом случае, исходя из формулы [180-182]:

$$ПВ_{ст} = \frac{t_{рп}}{t_{цп}}, \quad (6.23)$$

где  $t_{рп}$  – время работы импульсного ЛЭМД в режиме пакета;  $t_{цп} = t_{рп} + t_{п}$  – время цикла такого режима;  $t_{п}$  – время паузы, представляющее собой время до следующего удара.

Однако, в выражении (6.23) не отражена структура временного импульса, учет которой представляется необходимым для редкоударных ЛЭМД, используемых в приводе крупных машин (прессов, молотов и т.д.).

Для редкоударных импульсных ЛЭМД (молоты, прессы) будем считать, что время работы двигателя  $t_{ри}$  – это время нахождения его обмотки под импульсом тока за рабочий ход в течение единичного цикла, состоящего из рабочего и холостого ходов, в результате чего якорь двигателя совершает единичный удар, после чего наступает пауза до следующего единичного цикла длительностью  $t_{ед.ц}$ . Определим структуру этого времени.

Время  $t_{ри}$  нахождения обмотки импульсного ЛЭМД под импульсом тока при рабочем ходе включает в себя следующие составляющие [180; 183]:

$$t_{ри} = t_{тр} + t_{дв} + t_{г}, \quad (6.24)$$

где  $t_{тр}$  – время трогания якоря ЛЭМД, отсчитываемое от появления и нарастания тока в обмотке возбуждения до начала движения якоря;  $t_{дв}$  – время движения якоря под импульсом тока;  $t_{г}$  – время гашения магнитного поля.

Продолжительность цикла для редкоударных импульсных машин в этом случае будет отличаться от времени единичного цикла  $t_{ед.ц}$  временем паузы  $t_{п}$ :

$$t_{цп} = t_{ри} + t_{хх} + t_{п} = t_{ед.ц} + t_{п}, \quad (6.25)$$

где  $t_{хх}$  – время холостого хода (без тока) для конструктивной схемы двигателя, например, с возвратной пружиной [147; 149].

Время паузы  $t_{п}$  при единичном цикле будет  $t_{п} = t_{хх}$ , а при работе электромагнитной машины с частотой ходов в минуту  $n$  ( $n < n_{пред}$ ) оно зависит от этой

частоты. Следовательно, продолжительность цикла  $t_{ци}$  для редкоударных электромагнитных машин из (6.25) и рисунка 6.13 также зависит от частоты ходов, то есть  $t_{ци} = f(n)$ .

Например, при  $t_{п} = 0$  время цикла будет минимально возможным и равным времени единичного цикла:

$$t_{ед.ц} = t_{ри} + t_{хх}, \quad (6.26)$$

которое обеспечивает предельную частоту ходов машины  $n_{пред}$ .

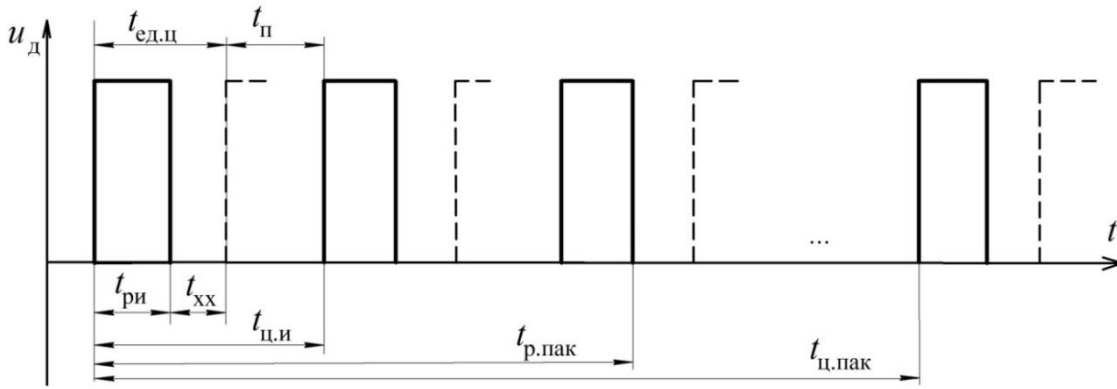


Рисунок 6.13 – Циклы частоударных и редкоударных электромагнитных машин

Введём понятие «относительное время  $\Delta t_*$  протекания тока в обмотке импульсного ЛЭМД за единичный цикл». В общем случае при времени паузы  $t_{п}$ , отличающемся от нуля, для редкоударных машин получим:

$$\Delta t_* = \frac{t_{ри}}{t_{ци}}. \quad (6.27)$$

Используя выражение (6.27), определим время  $t_p$  протекания тока в импульсном ЛЭМД, когда задано время работы машины  $t_{рп}$  в виде пакета импульсов:

$$t_p = t_{рп} \cdot \Delta t_*. \quad (6.28)$$

Продолжительность включения для редкоударных машин можно найти через ПВ<sub>ст</sub> из (6.23) для частоударных по формуле:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_{ци}} = \Delta t_* \cdot \frac{t_{рп}}{t_{ци}} = ПВ_{ст} \cdot \Delta t_*. \quad (6.29)$$

Выражение (6.29), в отличие от (6.23), позволяет учесть время нахождения

под током импульсных ЛЭМД редкоударных машин и, тем самым, определить с меньшей погрешностью, чем по (6.23), продолжительность включения.

Представим (6.29) через другие параметры, определяемые расчётными либо экспериментальными путями. Для этого подставим в (6.27) выражение для  $t_{ци}$  из формулы частоты ходов в минуту  $n = 60/t_{ци}$ , получим относительное время:

$$\Delta t_* = t_{ри} \cdot \frac{n}{60}, \quad (6.30)$$

где продолжительность цикла  $t_{ци}$  предполагает в ее составе паузу, обусловленную технологическим процессом (Рисунок 6.15). Из (6.30) следует, что, если длительность  $t_{ри}$  неизменна, то с ростом частоты ходов  $n$  относительное время также растёт.

Тогда выражение (6.29) с учетом (6.30) примет вид:

$$ПВ = ПВ_{ст} \cdot n \cdot \frac{t_{ри}}{60}. \quad (6.31)$$

Найдём минимально возможное относительное время протекания тока в импульсном ЛЭМД за единичный цикл, когда  $t_{п} = 0$ , с учетом (6.26) и (6.27):

$$\Delta t_{*мин} = \frac{t_{ри}}{t_{ед.ц}}. \quad (6.32)$$

Выражение (6.26) позволяет определить предельно возможную (максимальную) частоту ходов в минуту из экспериментальных данных:

$$n_{пред} = \frac{60}{t_{ед.ц}}. \quad (6.33)$$

Примем  $n_{пред}$  из (6.33) за базисную величину, выразив относительное значение частоты ходов  $n_*$  в минуту для импульсного ЛЭМД:

$$n_* = n \cdot \frac{t_{ед.ц}}{60}. \quad (6.34)$$

Тогда выражение (6.32) с учетом (6.33) и (6.34) примет вид:

$$ПВ = ПВ_{ст} \cdot n_* \cdot \Delta t_{*мин}, \quad (6.35)$$

в котором  $0 < n_* < 1$ .

Подставив в (6.27) значение времени  $t_{ри}$  из (6.23), получим относительное

время, выраженное через минимально возможное:

$$\Delta t_* = \Delta t_{*\text{мин}} \cdot \frac{t_{\text{ед.ц}}}{t_{\text{ци}}} . \quad (6.36)$$

Тогда с учётом (6.36) формула (6.29) для ПВ примет окончательный вид:

$$\text{ПВ} = \text{ПВ}_{\text{СТ}} \cdot \Delta t_{*\text{мин}} \cdot \frac{t_{\text{ед.ц}}}{t_{\text{ци}}} . \quad (6.37)$$

Выражения (6.35) и (6.37) позволяют определить истинное значение продолжительности включения ПВ импульсного ЛЭМД через значение  $\text{ПВ}_{\text{СТ}}$ , задаваемое в [180], а также через число ходов  $n_*$  и предельные значения времени протекания тока в ЛЭМД за единичный цикл  $\Delta t_{*\text{мин}}$ , времени единичного цикла  $t_{\text{ед.ц}}$  (при отсутствии паузы), времени цикла  $t_{\text{ци}}$  при наличии паузы, учитывая тем самым особенности работы технологического оборудования.

Минимально возможное время протекания тока  $\Delta t_{*\text{мин}}$  за единичный цикл можно определить адресно для конкретных ЛЭМД, выполняющих в прессовом оборудовании конкретные технологические операции.

Так, например, из анализа осциллограмм для рабочих процессов электромагнитных прессов ПЭМ–1,0 и ПЭМ–3,0 для клёпки, уплотнения литейных смесей величина  $\Delta t_{*\text{мин}} = 0,3$  [181]. На рисунке 6.14 представлено семейство характеристик  $\text{ПВ} = f(n_*)$  при  $\text{ПВ}_{\text{СТ}} = \text{const}$ .

Рассмотрим случай, когда частота ходов равна половине предельной, то есть  $n_* = n_a = 0,5$ . Тогда для  $\text{ПВ}_{\text{СТ}} = 0,4$  получим точку  $a$  (Рисунок 6.14), которой соответствует истинное значение  $\text{ПВ} = 0,06$ . Графически найденное значение ПВ подтверждается расчетом (п. 5.5.1). Для этого же  $\text{ПВ} = 0,06$  при различных  $\text{ПВ}_{\text{СТ}}$  можно получить другие частоты ходов. Так, для  $\text{ПВ}_{\text{СТ}} = 0,6$  получим  $n_* = 0,33$ , а для  $\text{ПВ}_{\text{СТ}} = 0,25$  получим  $n_* = 0,8$ .

Для импульсного ЛЭМД пресса ПЭМ–1,0 усилием 10 кН (1 тс) при частоте  $n = 60$  ход/мин, для продолжительности цикла  $t_{\text{ци}} = 1$  с и при длительности  $t_{\text{ед.ц}} = 144 \cdot 10^{-3}$  с согласно (6.36) получим относительное время:

$$\Delta t_* = 0,3 \cdot \frac{144 \cdot 10^{-3}}{1} = 0,0432 = 4,32\% ;$$

при  $n = 300$  ход/мин для времен  $t_{ци} = 0,2$  с и  $t_{ед.ц} = 144 \cdot 10^{-3}$  с получим:

$$\Delta t_* = 0,3 \cdot \frac{144 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 0,216 = 21,6\% .$$

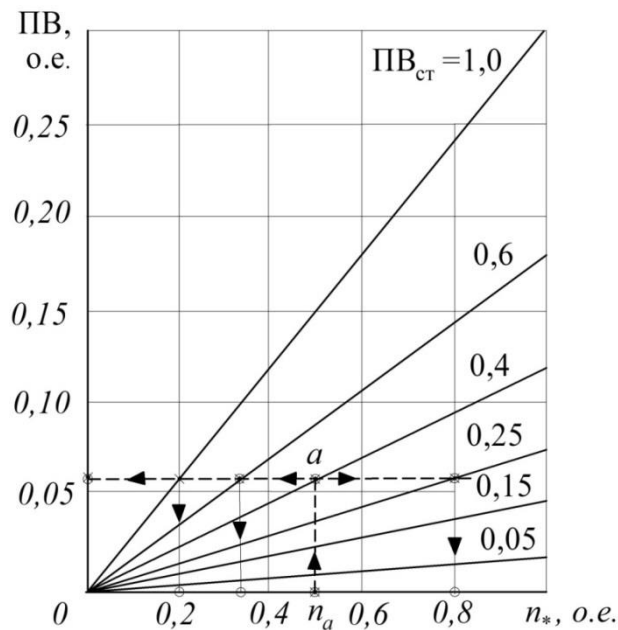


Рисунок 6.14 – Зависимость продолжительности включения ПВ от частоты ходов  $n_*$  редкоударной машины при  $\Delta t_{*мин} = 0,3$  для различных  $ПВ_{ст}$

Для импульсного ЛЭМД пресса ПЭМ–3,0 усилием 30 кН (3 тс) при частоте ходов в минуту  $n = 60$  ход/мин для времен  $t_{ци} = 1$  с и  $t_{ед.ц} = 186 \cdot 10^{-3}$  с получим:

$$\Delta t_* = 0,3 \cdot \frac{186 \cdot 10^{-3}}{1} = 0,0558 = 5,58\% ;$$

при  $n = 300$  ход/мин для времен  $t_{ци} = 0,1$  с и  $t_{ед.ц} = 186 \cdot 10^{-3}$  с получим:

$$\Delta t_* = 0,3 \cdot \frac{186 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 0,279 = 27,9\% .$$

Предельная частота ходов в минуту при известных конструктивных, геометрических, режимных и технологических факторах (без учёта теплового состояния) для ЛЭМД пресса ПЭМ–1,0 усилием 10 кН (1 тс) при  $t_{ед.ц} = 144 \cdot 10^{-3}$  с (определено из осциллограмм [181]) будет:

$$n_{пред} = \frac{60 \cdot 10^3}{144} = 417 \text{ ход/мин};$$

для ЛЭМД пресса ПЭМ–3,0 усилием 30 кН (3 тс) при  $t_{\text{ед.ц}} = 186 \cdot 10^{-3}$  с будет:

$$n_{\text{пред}} = \frac{60 \cdot 10^3}{186} = 323 \text{ ход/мин.}$$

Таким образом, оценка составляющих единичного цикла редкоударных импульсных машин с ЛЭМД позволяет учесть время нахождения под током обмотки двигателя и определить для режима непрерывных ходов продолжительность его включения. Попытка в экспериментах превысить предельную частоту ходов за счёт увеличения частоты питающих обмотку двигателя импульсов напряжения приводит к снижению энергии его рабочего хода и снижению ударной мощности, что подтверждается и расчётами [182].

Полученные выражения для продолжительности включения могут быть использованы при проектном расчёте электромагнитного привода.

### Выводы

1. Нагружение импульсного ЛЭМД в приводе редкоударных машин позволяет увеличить удельную энергию удара до 9 Дж/кг и выше и его КПД в 2 и более раза.

2. Перераспределение значительной части магнитной энергии, связанной с полями рассеяния импульсного ЛЭМД и его устройства удержания, позволяет увеличить механическую энергию рабочего хода на 30-35%. Установлено, что применение обратного диода для импульсных ЛЭМД усилием до 10 кН и полезной работой до 20 Дж при питании их от однофазной сети повышает энергию удара ЛЭМД в среднем на 20.....30% и более, снижает уровень потребляемой от источника энергии на 10...15% и повышает коэффициент мощности привода до 0,95, а также КПД. Однако при этом снижается максимальная частота ходов якоря до 180...240 мин<sup>-1</sup>.

3. Установленная связь между частотой ходов якоря и продолжительностью включения двигателя позволяет по экспериментальным динамическим характеристикам машины определить предельную частоту ходов.



## **ГЛАВА 7. КОНСТРУКТИВНЫЕ И СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЛЭМД**

### **7.1 Конструктивные схемы перспективного технологического оборудования с ЛЭМД**

#### **7.1.1 Импульсные механические воздействия в электротехнологических процессах**

В условиях истощения сырьевых ресурсов, экологических и социально-экономических затруднений особую значимость обретают ресурсосберегающие технологии, основанные на использовании концентрированных потоков энергии, среди которых доминируют процессы плазменной (дуговой) наплавки. Хронически нарастающий дефицит запасных частей и металла, низкие значения коэффициента его использования (0,3 при изготовлении деталей из поковок и 0,55 - из проката), а также недостаточная надёжность и долговечность деталей создают высокую напряжённость в ремонтном производстве, которое по своим масштабам стало соизмеримо с первичным производством. Такой подход, когда на недорогую заготовку или изношенную деталь, выполняющую функцию заготовки, наносят металл с заданными свойствами, создаёт предпосылки для наиболее полной реализации функциональных свойств, присущих каждому из материалов, входящих в деталь составной конструкции [31-33; 184-187].

Но специфика и спонтанный характер кристаллизации, химическая и структурная неоднородности наплавляемого металла и низкое его сродство с материалом основы часто приводят к деградации свойств деталей. Повышенная твёрдость, припуск (более 50% поступает в стружку) создают сложную ситуацию, связанную с механической обработкой (её доля в структуре общей трудоёмкости более 50 %). Поэтому при выборе способа наплавки и наплавочных материалов часто исходят не из получения высокого качества наплавленного слоя, а из условия лучшей его обрабатываемости [184; 185; 187].

Лидеры в области формообразования заготовок из научных школ ИЭС им.

Е. О. Патона, МВТУ им. Н. Э. Баумана и др. ориентируют на идею применения дополнительных внешних воздействий на металл в ходе его нанесения, то есть на технологический синтез условий, обеспечивающих заданные свойства широкой номенклатуры деталей с наплавленным рабочим элементом [31-33; 186].

Все методы внешнего механического импульсного воздействия можно условно разделить на следующие группы [31-33]:

1. Применение вибрирующих наплавочных форм с различной конфигурацией, размерами, изготовленных из различных материалов.
2. Наложение на расплав давлений и колебаний (одиночных ударов, низких и высокочастотных).
3. Пуансонное вытеснение металла в жидком или вязкопластичном состоянии.
4. Резание металла в ходе его нанесения.

Например, применение широкослойной наплавки (колеблющихся электродов, многоэлектродных процессов и др.) и изменение траектории движения электрода меняет интенсивность перераспределений присадочных материалов и легирующих добавок, позволяет регулировать толщину диффузионного слоя. Эти способы наиболее эффективны при наплавке массивных деталей. Перемешивание металла и использование экзотермических процессов повышают интенсивность турбулентного растекания расплава и кавитационные явления при этом, что способствует повышению равномерности и однородности распределения микроструктуры и твёрдости наплавленного слоя [31; 32; 187].

Использование формообразующих элементов в виде давящего, вибрирующего и режущего инструментов усиливает контактный теплообмен, способствует залечиванию трещин, и снижает радиус фронта распространения жидкой ванны, вызывает определённый рост скорости кристаллизации по мере увеличения теплопроводности наплавленного металла. Но главный положительный эффект от их применения заключается в возможности получения заданных геометрических параметров наплавки. Вибрация и перемешивание расплава вносят изменение температурного градиента на границе затвердевания (скорости кри-

сталлизации) и оказывает большое влияние на формирование рельефа поверхности [184; 185].

Наложение электромагнитных полей, низкочастотных колебаний на кристаллизующийся металл приводят к увеличению скоростей кристаллизации, зарождению и росту центров кристаллизации, коэффициента диффузии химических элементов, кристаллизационному давлению, снижению степени переохлаждения жидкой ванны и измельчению кристаллической структуры.

Все методы внешнего воздействия на металл предлагается классифицировать по физико-технологическим признакам на отдельные группы и применять их дифференцированно, в зависимости от агрегатного состояния металла и конструктивно-технологических характеристик деталей (Рисунок 7.1) [32; 48; 187].



Рисунок 7.1– Выделенные этапы и стадии формообразования

Рассмотрим примеры импульсного внешнего воздействия на металл на всех этапах его нанесения от переноса до полного охлаждения, когда он находится в жидкой, вязкопластичной и твёрдой фазах.

**Формообразование на стадии зарождения жидкой ванны.** Качество формообразования изделий закладывается уже на стадии зажигания дуги и в дальнейшем корректируется на последующих этапах развития и полного наведения жидкой ванны, кристаллизации и охлаждения металла. Заданная точность

изделия достигается за счёт применения двухциклового процесса формообразования:

- 1 - дозирование отдельной порции металла;
- 2 - введение формообразующих операций для окончательного придания заданной формы, (Рисунок 7.2).

При этом можно выделить три базовых варианта нанесения металла: 1 - тигельный, 2 - капельно-электродный; 3 - трёхфазной дугой, в которых время дозировки  $t_H$  зависит от размеров наплавленного рабочего элемента [32].

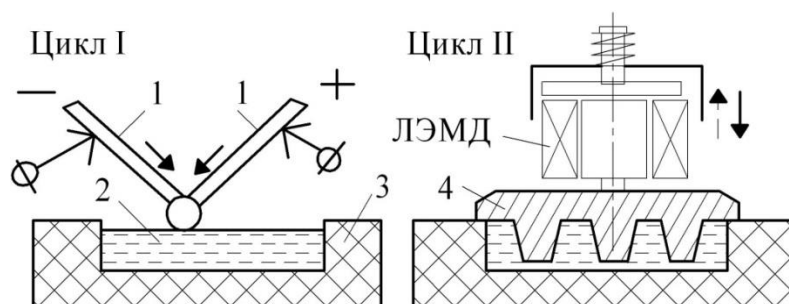


Рисунок 7.2 – Схема дозированного нанесения металла с последующей штамповкой:  
1 - электроды; 2 - расплав; 3 - форма; 4 - пуансон

**Перенос металла в зависимости от режимов наплавки** может протекать в виде капель разного диаметра, струй и в режиме коротких замыканий. Вибрация электрода от 1 Гц до 10 Гц позволяет сократить порции наносимого металла в два-три раза, что весьма важно с точки зрения формообразования мелких деталей (например, электрических контактов, электродов свечей, утолщений деталей). При наложении на подложку колебаний с частотой от 1 до 10 Гц жидкотекучесть расплава возрастает на 20...40%. Наложение на электрод поперечных низкочастотных вибраций частотой от 0,1 Гц до 5 Гц сокращает вдвое время формирования капли и повышает точность дозировки [31; 32; 187].

Формообразование на стадии полного наведения жидкой ванны характеризуется стабилизацией процесса горения дуги. Наличие большого объёма жидкой ванны создаёт реальные предпосылки для применения силовых воздействий (Рисунки 7.3 и 7.4): пуансонного вытеснения металла; погружение стержня с по-

следующим его удалением; наложения вибраций с помощью импульсного ЛЭМД [187].

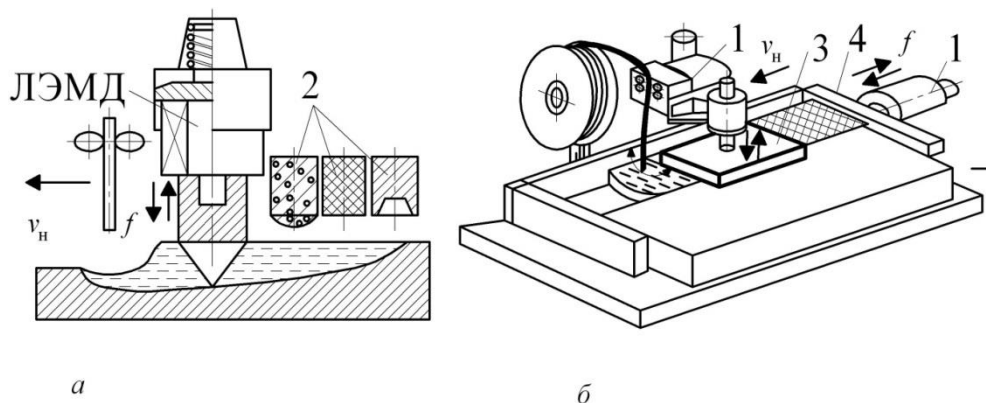


Рисунок 7.3 – Наплавка с пуансонным вытеснением (а) и низкочастотной вибрацией (б) с приводами от ЛЭМД: 1 - ЛЭМД; 2 – пуансон

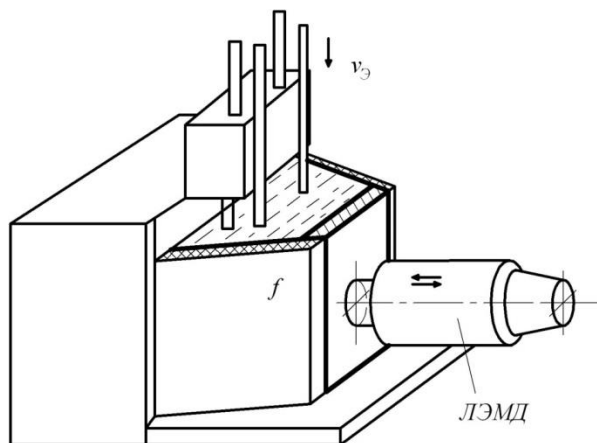


Рисунок 7.4 – Схемы нанесения металла в наплавочные формы многоэлектродным способом с вибрацией

Использование пуансонного вытеснения металла, погружения формовочных стержней, наложение низкочастотных колебаний и одиночных ударов на расплав позволяют воспроизводить тонкий рельеф формообразующего элемента (15...25 мкм), снизить величину наплавочного радиуса (с 10... 15 мм до 1,5...2,0 мм), уменьшить припуск (в 3...5 раз), сократить выход металла в стружку при получении периодического профиля.

Поиск сбалансированных температурно-скоростных и амплитудно-частотных параметров нанесения металла и выбор материала наплавочной фор-

мы и формообразующего элемента (ФЭ) следует проводить с позиции следующих физико-технических влияний на металл [32]:

- 1) по характеру силового воздействия пуансона (в свободной сварочной ванне; в наплавочной форме; с полым пуансоном; с применением промежуточных элементов);
- 2) по фазовому составу металла (в жидкой фазе; в жидко-твёрдой фазе; в вязкопластичном состоянии);
- 3) по кинетике движения пуансона (поступательное, возвратно-поступательное, с наложением вибрации, с удалением стержней);
- 4) по форме торцевого окончания и сечения пуансона (плоское, конусное, сферическое или сегментное, рельефное сечение);
- 5) по положению в пространстве (горизонтальное, вертикальное и наклонное положение);
- 6) по материалу пуансона (в металлических, графитовых, керамических и других материалах).

Для передачи движения пуансона можно использовать кулачковые, кривошипно-шатунные и электромагнитные устройства.

**Вибрационное воздействие.** Опыты показали, что периодическое встряхивание изложницы (высота подъёма 15-20 мм, частота 10-100 ударов в минуту) способствует равномерному распределению присадок, увеличению плотности и улучшению механических свойств металла [34].

Разработка термосиловых и вибрационных воздействий на металл сварочной ванны следует проводить с учётом характера силового воздействия ФЭ на металл, фазового состава, конфигурации виброформы и положения её в пространстве. При этом необходимо согласовать энергетические и термосиловые режимы (частоту вибраций, или одиночных ударов, место и температуру технологического воздействия, на наплавляемый металл). Классификацию способов ввода виброударов в процессе наплавки, скоростные параметры пуансонного вытеснения металла можно выразить в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Классификация способов ввода вибросиловых воздействий на металл

Классификационный признак	Способ ввода вибросиловых воздействий	Примечание
По состоянию наплавочной ванны	В свободной наплавочной ванне	Функцию формы может выполнять металл по границе ванны
	В наплавочных формах	
По конфигурации формообразующего элемента	Через плоскую стенку	Материал формообразующего элемента может быть металлическим, керамическим, графитовым и пр.
	Через вогнутую (выпуклую) поверхность	
	Через сложнорельефную поверхность	
	Полым пуансоном	
	Пуансоном сплошного сечения	
	С применением промежуточных элементов	
По фазовому составу металла	В жидкой фазе	Колебания можно накладывать на металл от жидкого состояния до твёрдого
	В жидкотвёрдой фазе	
	В вязкопластичном состоянии	
По кинетике движения пуансона	Поступательное	Возможны более сложные движения пуансонного воздействия
	Возвратно-поступательное	
	С наложением вибрации на пуансон	
	С удалением стержней	
По форме торцевого окончания и сечения пуансона	Плоское	Профиль вытесняющего элемента может быть рельефным (например, при художественной наплавке)
	Конусное	
	Сферическое (сегментное)	
	Сложное	
	С цилиндрическим, прямоугольным, треугольным и сложным окончанием сечения	
По положению в пространстве	Горизонтально	Положение вытесняющего элемента может изменяться
	Вертикально	
	Наклонно	
По материалу пуансона	Металл	Пуансоны могут быть составной конструкции
	графит	
	керамика и др. материалы	
По характеру силового воздействия	Погружением стержня (пуансона) в расплав. Контактным способом	Погружение может быть плавным, динамичным, с подпрессовкой.

Технологическая проработка термосиловых и вибрационных воздействий на кристаллизующийся металл выявили необходимость введения дополнительных формообразующих воздействий с целью снижения шероховатости поверхности и её упрочнения, а также повышения точности размеров.

Формообразование на этапе кристаллизации металла может протекать в режимах силового локального пуансонного вытеснения затвердевающего металла одиночными ударами, наложением низкочастотных колебаний на ФЭ (виброудары), роликовым выжиманием металла. При этом основное условие качественного формообразования заключается в отсутствии адгезии металла на ФЭ.

Формообразование на этапе охлаждения можно разделить на 3 группы [32]:

- 1 – обработка резанием;
- 2 – направленное охлаждение;
- 3 – поверхностно-пластическое деформирование (ППД)

Структурная схема технологического процесса терморезания металла с применением импульсного ЛЭМД показана на рисунке 7. 5.

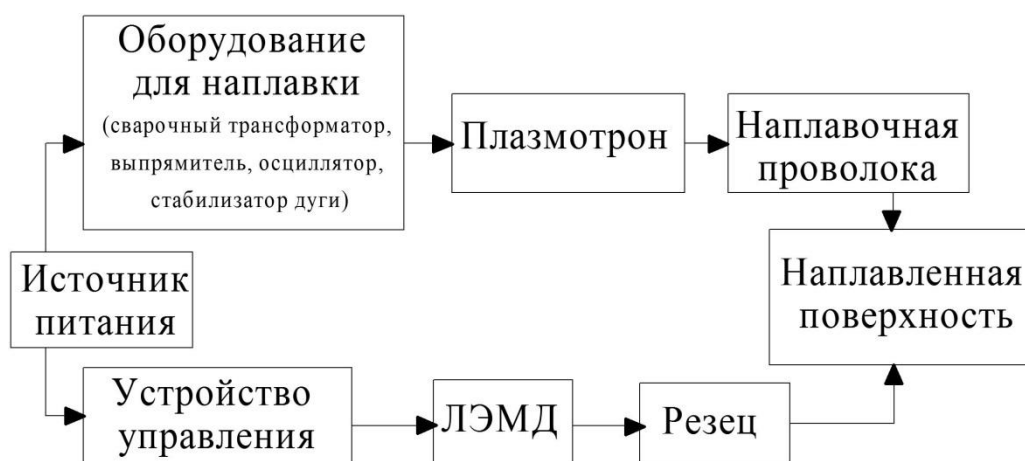


Рисунок 7.5 – Структурная схема технологического процесса терморезания металла [48].

Конструктивная схема обработки по принципу циклического терморезания с приводом от ЛЭМД показана на рисунке 7.6.

Дальнейшим развитием совмещённых методов наплавки явилась разработка принципа безотходной обработки металла резанием (Рисунок 7.7) [48].

В этом случае резец выполняет три функции: снимает стружку, сопровождает её и затем направляет в ванну для повторного переплава теплом, аккумулированным в ванне расплава.



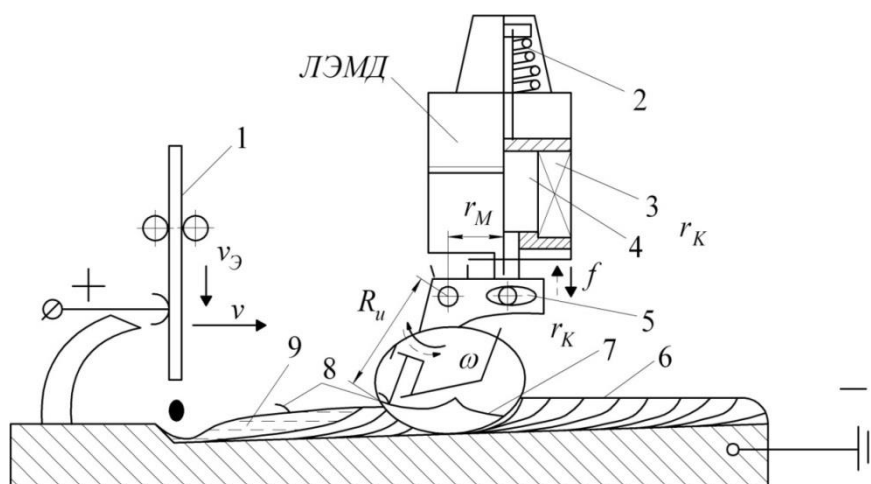


Рисунок 7.6 – Схема обработки по принципу циклического терморезания с приводом от ЛЭМД: 1 - электрод; 2 - пружина возврата якоря; 3 - соленоид; 4 - якорь; 5 - резец; 6 - обработанная поверхность; 7 - поверхность резания; 8 - стружка; 9 - сварочная ванна;  $v_э$ ,  $v_n$  - скорость подачи электрода и наплавки, соответственно;  $f$ ,  $\omega$  - усилие и частота возвратно-поступательно-качательного движений, соответственно;  $r_k$  - радиус кривизны.

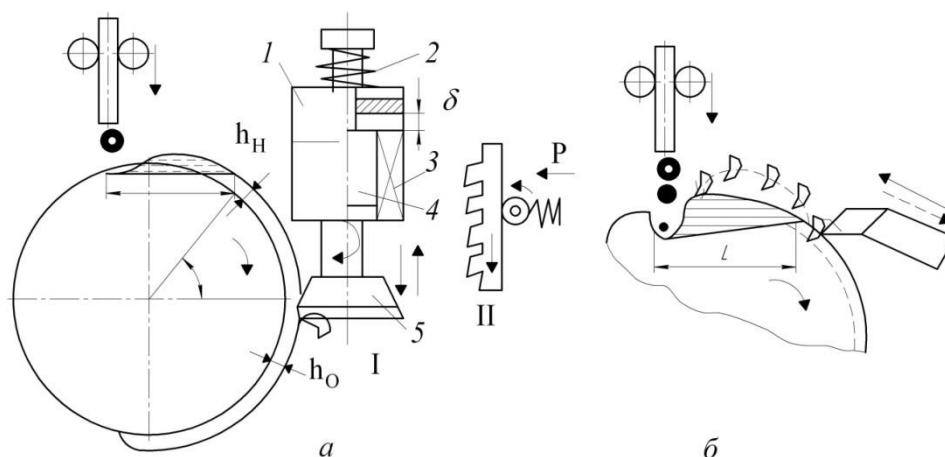


Рисунок 7.7– Схемы терморезания: а - резцом (I), протяжкой (II): 1 - статор; 2 - пружина; 3 - обмотка; 4 - якорь; 5 - резец; б - безотходное строгание

Разработанные способы терморезания металла в ходе его нанесения позволяют обрабатывать слои с высокой твёрдостью (до 50...60 HRC, с заданным уровнем шероховатости ( $R_z = 10...20$  мкм) при снижении сил резания в 2...4 раза по сравнению с традиционными способами, повысить стойкость инструмента в 3...5 раз, вести процесс по флюсовой корке и с притуплённой режущей кромкой за счёт возвратно-качательного принципа движения резца с выглаживающим эффектом [32; 34; 187].

Технологическая реализация методов и средств наплавки с принудительным формообразованием показала ряд достоинств: получение мелких деталей и различного рода утолщений и выступов в изделиях при высоком коэффициенте использования металла; сведение к минимуму припуска на обработку за счёт применения наплавочных форм оригинального состава, наложения низкочастотных вибраций или ударов, применения вытесняющего формообразующего инструмента, погружение в расплав стержней; обработка в едином технологическом цикле практически с любой твёрдостью наплавленного металла при снижении сил резания в 2...4 раза и повышении стойкости инструмента в 3...5 раз, а в некоторых случаях – с эффектом «безотходности» (режущий инструмент выполняет функции резания и подачи стружки в сварочную ванну для повторного переплава); получение изделия с улучшенными свойствами.

Использование импульсных механических воздействий в наплавочных процессах выявили возможность управлять структурой, твёрдостью и физико-механическими свойствами металла, а также однородностью и равномерностью их распределения за счёт применения факторов технологического внешнего воздействия и изменения условий нанесения металла колеблющимися электродами.

При наплавке низко- и среднелегированными материалами можно повысить качество наплавленного слоя применением поверхностно-пластической деформации с использованием ЛЭМД (Рисунок 7.8).

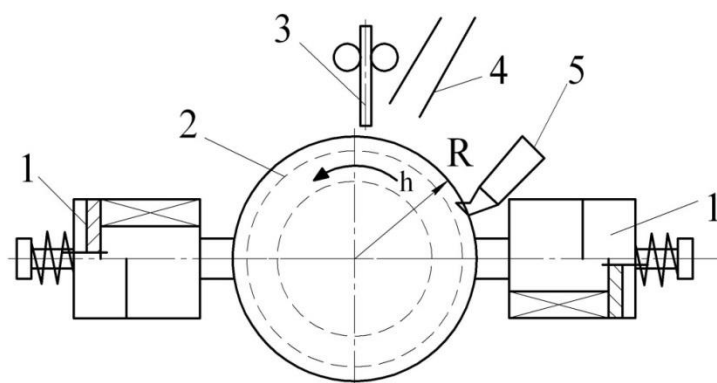


Рисунок 7.8 – Поверхностно-пластическое деформирование с использованием ЛЭМД: 1 – ЛЭМД; 2 - деталь; 3 – электрод; 4 – флюсопатрубок; 5 – резец для снятия флюсовой оболочки

В этом случае реализуется динамический метод упрочнения путём проковки металла пуансонами.

Представляет интерес применения импульсного ЛЭМД в приводе механизма подачи проволок [187]. Механизм подачи проволок выполняет важнейшую функцию в дуговых процессах. Он должен обеспечить равномерное поступление материала в технологическую зону и обладать регулируемыми функциями, долговечностью, универсальностью.

Существует множество различных вариантов конструктивных решений при проектировании этого механизма. Но довольно часто они не обеспечивают заданных функций. Особенно сложно реализовать на практике подачу электродов без проскальзывания, например, порошковых проволок. Механизм подачи проволок с пружинным зажимом отличается простотой, универсальностью, высокой степенью точности дозирования электродного или присадочного материала при их поступлении в технологическую зону (Рисунок 7.9).

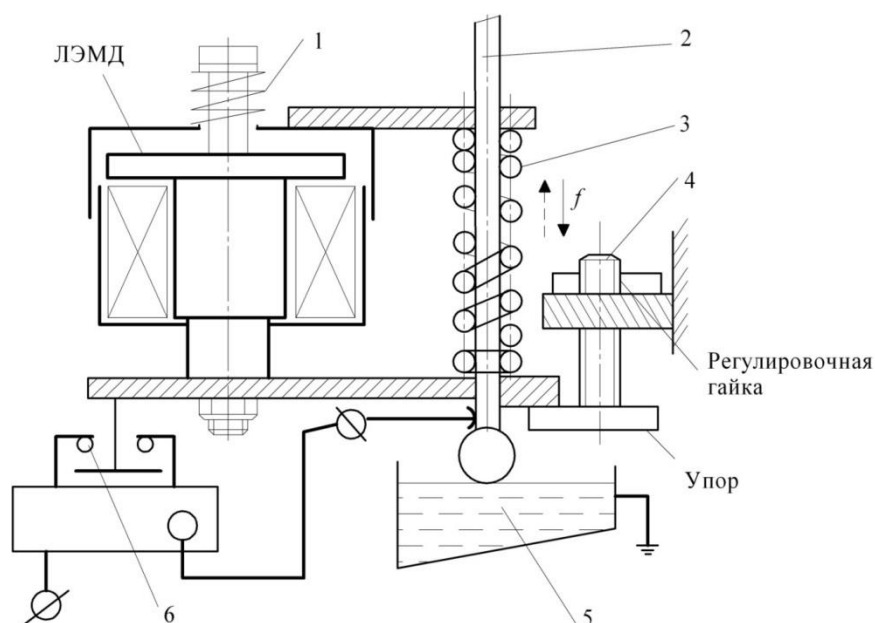


Рисунок 7.9 – Схема дозированной наплавки в режиме коротких замыканий с помощью ЛЭМД: 1 - возвратная пружина; 2 - электрод; 3 - зажим-пружина; 4 - регулировочный упор; 5 - ванна расплава; 6 – контакт

При пружинном зажиме увеличивается площадь контакта с проволокой, а, следовательно, и проталкивающая сила.

Определённый положительный эффект от применения пружинного зажима проявляется при дуговом нанесении металла в режиме коротких замыканий. Это свойство особенно актуально для дозированного нанесения металла при изготовлении мелкогазмерных деталей и изделий с небольшими наплавленными рабочими элементами [32]. Пружинный зажим эффективно функционирует с приводом от ЛЭМД, который обеспечивает фиксированный ход электродной проволоки и отрывистый характер капельного переноса.

В рассмотренных схемах технологического оборудования с концентрированными потоками энергии могут использоваться однообмоточные ЛЭМД, выполненные, в основном, по конструктивной схеме с возвратной пружиной и с тяговыми характеристиками, присущими как для двигателей продольного, так и поперечного магнитного поля.

### **7.1.2 Сравнение конструктивных схем однообмоточных электромагнитных машин**

К настоящему времени накоплен значительный опыт проектирования и эксплуатации электромагнитных приводов для ряда импульсных технологий [9; 18; 117; 188]. Импульсный ЛЭМД, входящий в состав такого привода, выполняется по различным конструктивным схемам для организации возвратнопоступательного движения якоря. Однообмоточные конструкции таких двигателей выполняются с возвратной пружиной, с пружинным накопителем, с противовесом и т.п. Наиболее часто используется схема с возвратной пружиной. Реже используется конструктивная схема с пружинным накопителем, в которой цикл начинается с холостого хода, а завершается рабочим. Каждая из этих схем обладает рядом особенностей.

В работе [155] приводятся экспериментально полученные результаты сравнительного анализа динамики рабочих циклов ударных машин, выполненных по рассмотренным конструктивным схемам. В качестве исследуемой физической модели в эксперименте использован однообмоточный импульсный

ЛЭМД переносной ударной машины для погружения стержневых элементов в грунт. В этой работе одна и та же пружина использована для совершения как холостого хода в схеме с возвратной пружиной, так и для рабочего хода в схеме с пружинным накопителем. Кроме того, конечные скорости якоря как при рабочем ходе, так и при холостом ходе, были одинаковыми за счет длительности импульса питающего напряжения [155]. Однако при таких условиях сравнения избыточная накопленная кинетическая энергия к концу холостых ходов будет преобразовываться в тепловые потери и шум при работе двигателя, снижая его энергетические показатели и надежность.

Сравним обе конструктивные схемы между собой на основе полученных выражений энергетических и динамических характеристик однообмоточного импульсного ЛЭМД (Рисунок 7.10). В качестве критериев сравнения целесообразно использовать следующие: энергию удара, частоту ходов якоря для режима непрерывных ходов и ударную мощность для такого же режима [149; 189]. Целесообразно сравнить эти конструктивные схемы при таком режиме работы ударной машины, когда конечные скорости якоря при рабочих ходах будут значительно выше, чем при холостых ходах, в отличие от [155], где эти скорости одинаковы. В пределе при холостых ходах конечные скорости якоря невелики и близки к нулю, что соответствует безударному холостому ходу машины.

Предварительно получим расчетные выражения энергетических и динамических характеристик конструктивной схемы двигателя с пружинным накопителем (Рисунок 7.10 б) в виде трех названных выше критериев. Для этого, как и в п. 5.1, а так же в [120; 135; 144-149], используем известное выражение (5.5) кинетической энергии якоря импульсного ЛЭМД, полученное с помощью принципа взаимности для электромеханических систем без учета потерь в магнитопроводе двигателя от перемагничивания и вихревых токов, а также потерь, связанных с преодолением сил трения.

Примем  $\eta_m = 0,5$  согласно рекомендациям п.5.1. Такое приближенное выражение позволяет, не решая дифференциальных уравнений движения, найти кинетическую энергию  $A_k$  якоря двигателя (энергию удара  $A_y$ ) по его статиче-

ским характеристикам – интегральной работе  $A_{и}$  и работе  $A_{п}$ , связанной с противодействующим усилием:

$$A_{к} = 0,5 \cdot (A_{и} - A_{п}) = A_{у}. \quad (7.1)$$

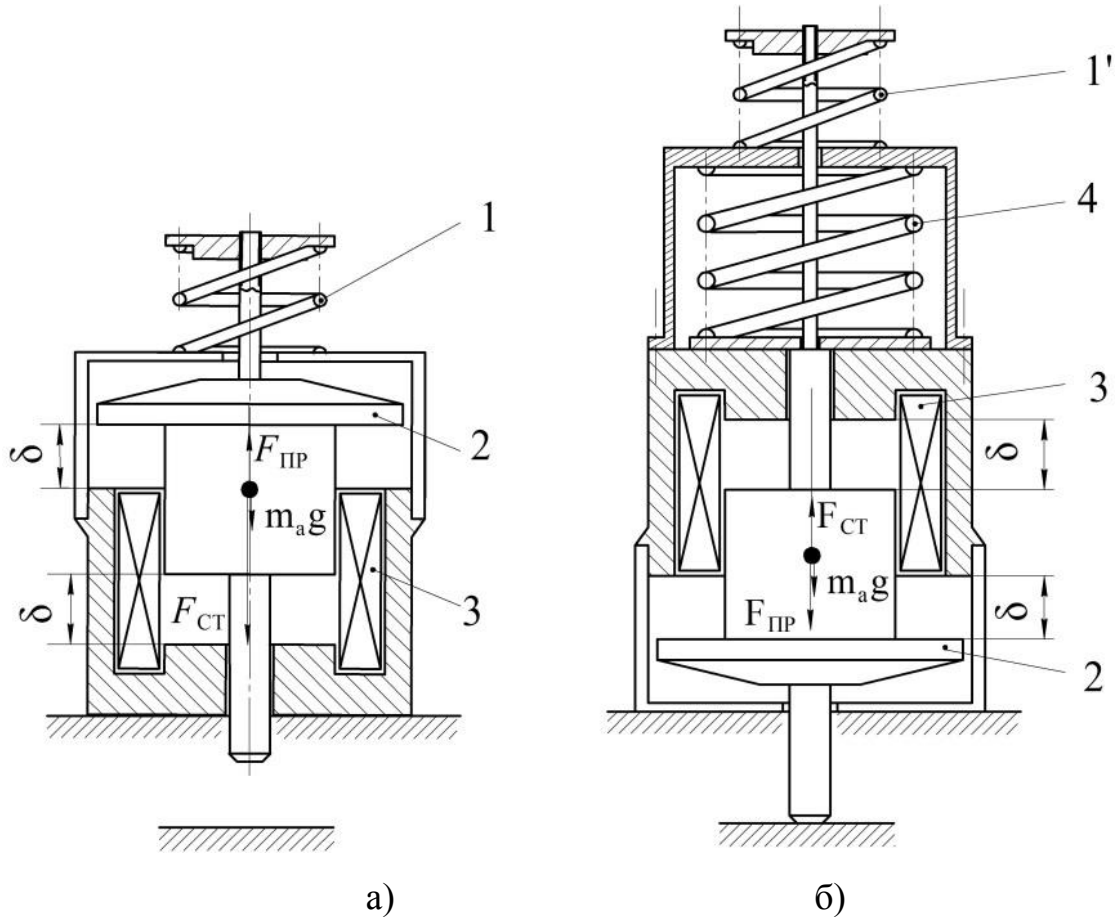


Рисунок 7.10 – Конструктивные схемы однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной (а) и с пружинным накопителем (б): 1 – возвратная пружина; 1' – вспомогательная пружина; 2 – якорь; 3 – обмотка возбуждения; 4 – накопительная пружина

При выводе энергетических и динамических характеристик учтены те же допущения, что и в работах [135; 146-149]: двигатель расположен вертикально, начальная скорость движения его якоря равна нулю, при холостом ходе машины противодействующее якорю усилие накопительной пружины  $F_{ПР}$  пропорционально его перемещению  $\delta$ , характеристики питающего импульса напряжения и пружины неизменны, имеется соответствие окончания и появления тока в обмотке моментам остановки якоря, совершающего рабочий или холостой ход. Кроме того, в обесточенном состоянии обмотки 3 и нижнем (исходном) поло-

жении якоря 2 (Рисунок 7.10 б) его вес уравновешен вспомогательной пружиной 1'. С её помощью устанавливают исходное положение якоря с усилием начального поджатия  $F_0$  накопительной пружины, у которой жесткость  $c$  неизменна на всем перемещении якоря, массой пружин пренебрегаем.

С целью упрощения примем, что значения статического тягового усилия  $F_{СТ}(\delta)$  двигателя не зависят от перемещения  $\delta$  [135; 146-149], тогда

$$A_{И} = \int_{\delta_H}^{\delta_K} F_{СТ}(\delta) d\delta = F_{СТ} \cdot (\delta_H - \delta_K) = F_{СТ} \cdot \delta,$$

где  $\delta_H, \delta_K$  – начальный и конечный рабочие зазоры;  $\delta = \delta_H - \delta_K$ .

В итоге получим энергию удара  $A_{Y*}^{ПН}$ , выраженную через относительные усилие начального поджатия накопительной пружины 4 (Рисунок 7.10 б)  $F_{0*} = F_0 / (m_a \cdot g)$  и жесткость накопительной пружины  $c_* = c \cdot \delta / (m_a \cdot g)$ :

$$A_{Y*}^{ПН} = A_Y / (m_a \cdot g \cdot \delta) = 0,5 \cdot c_* + F_{0*} + 1, \quad (7.2)$$

где  $m_a$  – масса подвижных частей якоря;  $g$  – ускорение свободного падения.

Если принять, что для этапа холостого хода машины при полностью возбуждаемом и равном  $\delta$  перемещении якоря его кинетическая энергия  $A_K$ , определяющая выбег, должна к концу перемещения отсутствовать, то для  $A_K = 0$  получим:

$$F_{СТ} \cdot \delta = m_a \cdot g \cdot \delta + A_{ПР},$$

откуда получаем соотношение, связывающее энергию удара, статическую силу тяги, массу подвижных частей, жесткость и усилие начального поджатия пружины при условии  $A_K = 0$ , то есть при условии безударного холостого хода:

$$F_{СТ} = m_a \cdot g + 0,5 \cdot c \cdot \delta + F_0$$

или в относительной форме:

$$F_{СТ*} = 1 + 0,5 \cdot c_* + F_{0*}. \quad (7.3)$$

Из (7.3) следует, что каждому значению жесткости и усилия начального поджатия пружины и массы подвижных частей соответствует определенное значение статической силы тяги ЛЭМД, при котором выбег якоря отсутствует. Если это усилие  $F_{СТ*} > 1 + 0,5 \cdot c_* + F_{0*}$ , то при ограниченном перемещении якоря из-

быток его кинетической энергии при холостом ходе машины будет преобразовываться в другие виды энергии, например, в механическую при ударе якоря о детали конструкции ЛЭМД, и рассеиваться в тепло. Величина энергии удара при этом не изменится, однако КПД двигателя упадет, повысится шум и снизится надежность привода. Если  $F_{СТ*} < 1 + 0,5 \cdot c_* + F_{0*}$ , то величина перемещения якоря станет меньше  $\delta$ , а полезная энергия (например, энергия удара) понизится. Кроме того, для некоторых приводов необходимо обеспечить заданное перемещение  $\delta$ , чтобы, например, взвести накопительную пружину. Для работоспособности исследуемой конструктивной схемы машины для импульсных технологий должно существовать соответствие между параметрами пружинного накопителя и статическим тяговым усилием импульсного ЛЭМД. Следовательно, регулировочные свойства такой конструктивной схемы ограничены верхним пределом, при котором полезная энергия будет неизменной.

Для исследуемой конструктивной схемы существуют области допустимых значений параметров в виде ограничений, для которых выполняется (7.3):

$$F_{0*} \geq 0; c_* \geq 1; F_{СТ*} > 1. \quad (7.4)$$

Аналогичное выражение энергии удара для конструктивной схемы однообмоточного импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной  $A_{у*}^{ВП}$  получено в работе [149]:

$$A_{у*}^{ВП} = 0,5 (F_{СТ*} + 1 - 0,5 c_*). \quad (7.5)$$

Таким образом, выражения (7.2) и (7.5) используем для сравнения по первому критерию.

Поскольку конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной (Рисунок 7.10 а) является самой распространенной, то при сравнении она нами принята за базу. Следовательно, с учетом (7.2)-(7.5) получим выражение для сравнения конструктивных схем по первому критерию:

$$\frac{A_{у*}^{ПН}}{A_{у*}^{ВП}} = \frac{1}{0,5 + (0,5 - 0,25c_*) / F_{СТ*}}. \quad (7.6)$$

На рисунке 7.11 представлены зависимости первого критерия  $A_{у*}^{ПН} / A_{у*}^{ВП}$



от режимного  $F_{ст*}$  и конструктивного  $c_*$  параметров исследуемых схем.

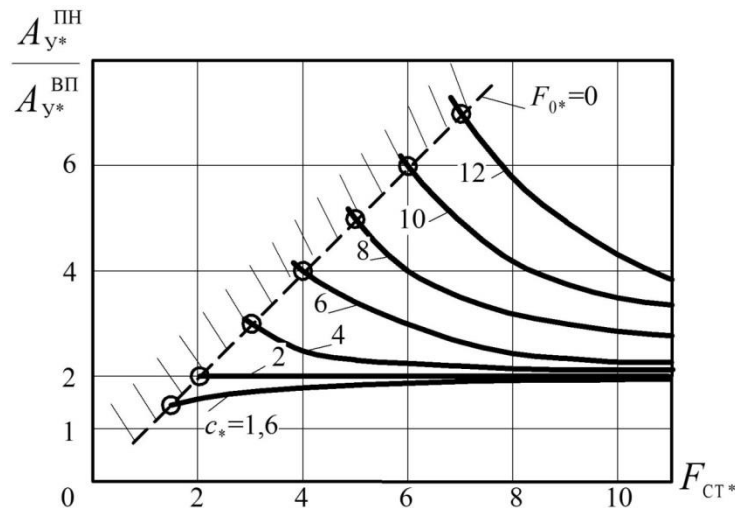


Рисунок 7.11 – Сравнение конструктивных схем по критерию  $A_{y*}^{ПН} / A_{y*}^{ВП}$

Для каждой совокупности параметров  $F_{ст*}$ ,  $F_{0*}$  и  $c_*$  предельное значение критерия  $A_{y*}^{ПН} / A_{y*}^{ВП}$  ограничено точками (кружочками на рисунке 7.11), в которых значение параметра  $F_{0*} = 0$ . Заштрихованная область соответствует недопустимому сочетанию параметров для схемы с пружинным накопителем, при котором в течение холостого хода накопитель не «зарядится». В диапазоне допустимого изменения этих параметров конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем превосходит по первому критерию схему с возвратной пружиной в 1,5...4 раза.

Кроме того, благодаря падающему по перемещению движущему усилию конструктивная схема с пружинным накопителем (Рисунок 7.10 б) обеспечивает и бóльшую стабильность энергии удара по сравнению со схемой (Рисунок 7.10 а), что показано в главе 4 и работе [15]. С ростом жесткости  $c_*$  накопительной пружины и, соответственно, тягового усилия  $F_{ст*}$  превосходство конструктивной схемы (Рисунок 7.10 б) возрастает. Для реализованных на практике конструкций импульсных ЛЭМД значения, например, относительного тягового усилия  $F_{ст*}$  составляют 50...100 и более.

Как известно, цикл машины с пружинным накопителем начинается с холостого хода длительностью  $t_{хх}$ , а заканчивается рабочим ходом длительностью  $t_{рх}$ . Их сумма определяет время цикла  $t_{ц}$ , а по нему легко найти относительное число

ходов якоря в минуту  $n_*$  при заданных параметрах  $F_{CT*}$ ,  $F_{0*}$  и  $c_*$ . Для нахождения  $t_{xx}$  и  $t_{px}$  потребуется использовать решение дифференциального уравнения, найденное в работе [149], и применить его к холостому и рабочему ходам якоря. В результате получим для режима непрерывных ходов машины выражение частоты ходов импульсного ЛЭМД с пружинным накопителем.

$$n_*^{ПН} = \frac{60}{t_{Ц*}} = \frac{60 \cdot \sqrt{2 \cdot c_*}}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{1 + c_* / (F_{CT*} - 0,5 \cdot c_*)}\right)}. \quad (7.7)$$

Аналогичное выражение частоты ходов импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной для режима непрерывных ходов получено в работе [149]:

$$n_*^{ВП} = \frac{60}{\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2(c_* - 1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(1 - \frac{2c_*}{F_{CT*} + 1 + 0,5c_*}\right) \right]}. \quad (7.8)$$

С учетом выражений (7.7), (7.8) и принятых выше ограничений получим выражение для сравнения конструктивных схем по второму критерию:

$$\frac{n_*^{ПН}}{n_*^{ВП}} = \frac{\sqrt{2 \cdot c_*} \cdot \left[ \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2(c_* - 1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(1 - \frac{2c_*}{F_{CT*} + 1 + 0,5c_*}\right) \right] \right]}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{1 + c_* / (F_{CT*} - 0,5 \cdot c_*)}\right)}. \quad (7.9)$$

На рисунке 7.12 представлены зависимости второго критерия  $n_*^{ПН} / n_*^{ВП}$  от режимного  $F_{CT*}$  и конструктивного  $c_*$  параметров исследуемых схем, полученные по выражению (7.9). Для каждой совокупности параметров  $F_{CT*}$ ,  $F_{0*}$  и  $c_*$  предельное значение этого критерия ограничено точками (кружочками), в которых значение параметра  $F_{0*} = 0$ . Заштрихованная область соответствует недопустимому сочетанию параметров для схемы с пружинным накопителем.

Из рисунка 7.12 следует, что конструктивная схема ЛЭМД с пружинным накопителем по критерию  $n_*^{ПН} / n_*^{ВП}$  уступает схеме ЛЭМД с возвратной пружиной всего на 15...25 %. Это происходит из-за вынужденного увеличения времени движения якоря на интервале холостого хода для исключения удара в

конечной точке. Так же из графика видно, что с ростом жесткости накопительной пружины  $c_*$  превосходство схемы ЛЭМД с возвратной пружиной падает.

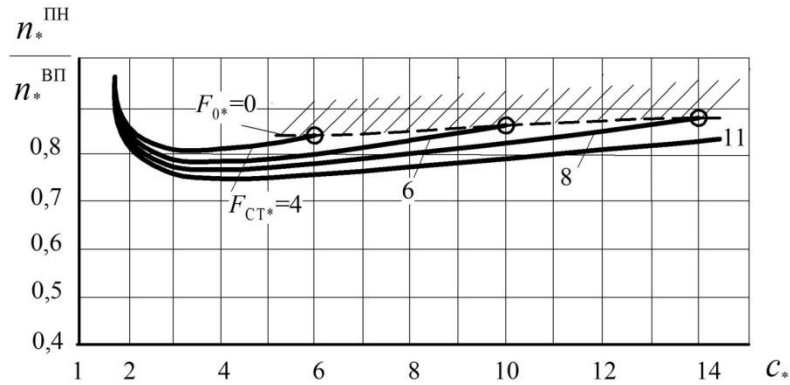


Рисунок 7.12 – Сравнение конструктивных схем по критерию  $n_*^{\text{ПН}} / n_*^{\text{ВП}}$

Для режима непрерывных ходов на основе формул (7.2) и (7.7) и с учетом ограничений (7.3) и (7.4) получим выражение ударной мощности импульсного ЛЭМД по схеме с пружинным накопителем:

$$P_{y*}^{\text{ПН}} = A_{y*}^{\text{ПН}} \cdot n_*^{\text{ПН}} = \frac{60F_{CT*} \cdot \sqrt{2 \cdot c_*}}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{1 + c_*/(F_{CT*} - 0,5 \cdot c_*)}\right)}. \quad (7.10)$$

Аналогичное выражение ударной мощности для конструктивной схемы импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной получено в работе [149]:

$$P_{y*}^{\text{ВП}} = \frac{30(F_{CT*} + 1 - 0,5c_*)}{\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2(c_* - 1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(1 - \frac{2c_*}{F_{CT*} + 1 + 0,5c_*}\right) \right]}. \quad (7.11)$$

Выражения (7.10) и (7.11) позволяют получить формулу для сравнения исследуемых конструктивных схем по третьему критерию  $P_{y*}^{\text{ПН}} / P_{y*}^{\text{ВП}}$ :

$$\frac{P_{y*}^{\text{ПН}}}{P_{y*}^{\text{ВП}}} = \frac{2F_{CT*} \cdot \sqrt{2 \cdot c_*} \cdot \left[ \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2(c_* - 1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(1 - \frac{2c_*}{F_{CT*} + 1 + 0,5c_*}\right) \right] \right]}{\left[ \frac{3\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{1 + c_*/(F_{CT*} - 0,5 \cdot c_*)}\right) \right] \cdot (F_{CT*} + 1 - 0,5c_*)}. \quad (7.12)$$

Рассмотрим зависимости третьего критерия  $P_{y*}^{\text{ПН}} / P_{y*}^{\text{ВП}}$  от режимного  $F_{CT*}$  и конструктивного  $c_*$  параметров исследуемых схем (Рисунок 7.13), полученные

по выражению (7.12).

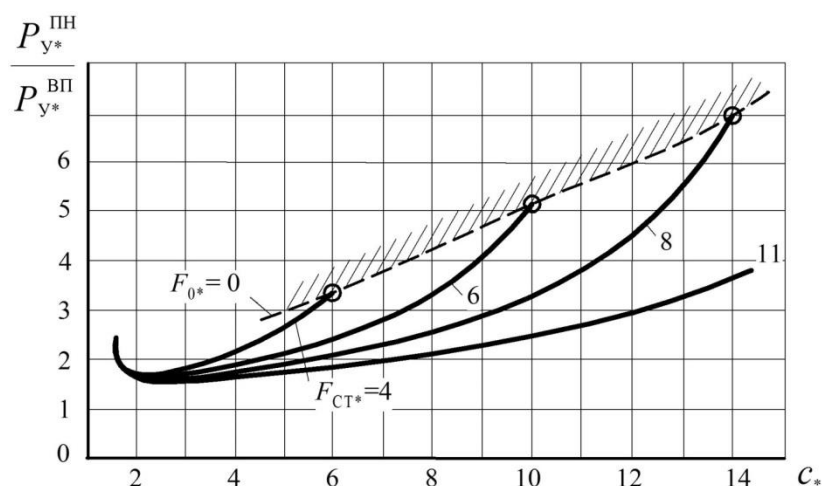


Рисунок 7.13 – Сравнение конструктивных схем по критерию  $P_{y*}^{\text{ПН}} / P_{y*}^{\text{ВП}}$

Для каждой совокупности параметров  $F_{СТ*}$ ,  $F_{0*}$  и  $c_*$  предельное значение этого критерия ограничено точками (кружочками), в которых значение параметра  $F_{0*}=0$ . Заштрихованная область соответствует недопустимому сочетанию параметров для схемы с пружинным накопителем и поэтому не используется для сравнения.

Из рисунка 7.13 следует, что во всем диапазоне изменения жесткости  $c_*$  пружинного накопителя эта схема по третьему критерию превосходит в 1,5...4 раза конструктивную схему импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной и с ростом жесткости это превосходство увеличивается.

Машины, выполненные по конструктивной схеме однообмоточного импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной, значительно проигрывают машинам, выполненным по конструктивной схеме однообмоточного импульсного ЛЭМД с пружинным накопителем по величине энергии удара и ударной мощности при одних и тех же параметрах  $F_{СТ*}$ ,  $F_{0*}$  и  $c_*$ , однако, на 15...25 % превосходят по частоте ходов. При наличии фиксатора схема с пружинным накопителем позволяет сохранить механическую энергию после «зарядки» механического аккумулятора и использовать ее, например, на объектах без электроснабжения [155].

Таким образом, по сравнению со схемой однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с пружинным

накопителем по энергетическим характеристикам (энергия удара в режиме одиночных ходов и ударная мощность в режиме непрерывных ходов) является более предпочтительной и перспективной, обеспечивая большую стабильность этих характеристик. Однако она незначительно уступает схеме с возвратной пружиной по динамическим характеристикам при условии безударного холостого хода, в то же время обладает высоким быстродействием при выполнении рабочего хода, совершаемого под действием пружины.

К недостаткам конструктивной схемы однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем следует отнести ограниченную возможность регулирования энергии удара с помощью устройства питания и управления из-за необходимости замены и регулирования накопительной пружины.

## **7.2 Рекомендуемые схемы устройств питания и управления импульсными ЛЭМД от промышленной сети**

Работоспособность импульсных ЛЭМД возможна при питании их обмоток электрическими импульсами определённой амплитуды, формы и длительности. Для этой цели в состав электромагнитного привода, который осуществляет управляемое электромеханическое преобразование энергии, входят устройства питания и управления (УПУ), которые преобразуют напряжение источника питания в импульсы напряжения необходимой амплитуды, формы, длительности и частоты. В результате создается требуемое изменение электромагнитного тягового усилия ЛЭМД при рабочем ходе.

Многообразие технологических процессов вызывает необходимость не только разработки различных конструкций импульсных ЛЭМД, отличающихся соотношениями их геометрических размеров, формой тяговых характеристик, величиной интегральной работы и т.д., но и создания УПУ, которые бы электрическими способами смогли обеспечить требуемые технологические режимы (одиночные ходы, серии ходов и т.д.), возможность регулирования выходных параметров ЛЭМД, а также повышение их удельных энергетических показателей. В результате расширяются технологические возможности оборудования с

ЛЭМД, и оно становится более универсальным [9; 18; 19; 50].

### 7.2.1 Способы регулирования выходных параметров ЛЭМД

Особенности построения УПУ как для ручных электромагнитных машин (с частотой ходов до  $3000 \text{ мин}^{-1}$ ), так и для мощных электромагнитных молотов (с энергией удара до 30 кДж) не всегда позволяют использовать их для целей регулирования выходных параметров ЛЭМД.

Рассмотрим вопросы построения УПУ для импульсных ЛЭМД, используемых в приводе технологического оборудования и выполненных по конструктивной схеме с одной обмоткой и возвратной пружиной при средней потребляемой мощности до 10 кВт, с частотой ходов до  $600 \text{ мин}^{-1}$  (10 Гц). Приведенный в [9] анализ работы технологического оборудования на примере электромагнитных прессов, сравнение их характеристик показывает, что выходные параметры, надежность и производительность такого оборудования, а также энергетические показатели ЛЭМД и всего привода в значительной мере определяются УПУ.

Первые разработанные УПУ для прессового оборудования (ПО) обеспечивали единичное срабатывание пресса при каждом нажатии на педаль управления, а также автоматическое включение его с фиксированной частотой ходов, были просты и питались от промышленной сети. Отсутствие или узкий диапазон регулирования длительности импульса тока при ее невысокой точности приводили к нестабильности энергии рабочего хода ЛЭМД, браку при выполнении технологических операций и снижали технический уровень привода.

Электромагнитные прессы, рассмотренные в работах [9; 190-192], оснащены более совершенными УПУ, что позволило эффективнее использовать ЛЭМД в приводе ПО. Так, для разработанной гаммы ЛЭМД с усилием в конце хода от 1 до 10 кН, созданы УПУ, позволяющие при питании привода от однофазной промышленной сети регулировать энергию удара ЛЭМД. Поскольку для питания мощных двигателей с усилием свыше 10 кН, обладающих значительными электромеханическими и электромагнитными постоянными времени, требуется

трехфазная промышленная сеть, то применительно к ней были созданы УПУ, регулирующие длительность импульса напряжения на обмотке двигателя дискретно с шагом, равным  $T/m$ , где  $T$  и  $m$  - период и число фаз сети [9; 193].

Анализ отмеченных УПУ, их сравнение и оценка в системе общепринятых критериев [9; 12] свидетельствует о том, что они в сочетании с разработанными ЛЭМД, имеющими более высокие удельные показатели, позволили в целом повысить технический уровень ПО с ЛЭМД, наметить перспективные идеи его развития. Рассмотренные в работах [9; 192-199] устройства хотя и обладают отдельными необходимыми для УПУ свойствами, однако не позволяют осуществлять плавное и точное регулирование выходных параметров ЛЭМД. Кроме того, известные УПУ не способны поддерживать заданные выходные параметры пресса при изменении напряжения источника питания.

Анализ структуры УПУ показывает, что основным его элементом является полупроводниковый преобразователь (ПП) с устройством управления (УУ). С целью обеспечения высокой надежности и простоты в качестве ПП используют тиристорные выпрямители. При использовании в качестве источника промышленной сети среднее значение напряжения на обмотке ЛЭМД определяется напряжением этого источника, моментом включения тириستоров ПП и длительностью их проводимости.

Основанный на указанной закономерности известный способ регулирования, заключающийся в изменении среднего значения напряжения обмотки ЛЭМД путем изменения момента включения тиристоров (угла управления  $\alpha$ ), широко используют в традиционном электроприводе и приводе электромагнитных молотов [12]. Однако наличие системы импульсно-фазового управления (СИФУ) в составе УУ вызывает усложнение, снижение коэффициента мощности привода с ростом угла  $\alpha$ . Это объясняется искажением формы выпрямленного напряжения, подводимого к двигателю. Коэффициент мощности привода  $\chi$  определяется:

$$\chi = v \cdot \cos \varphi_1 ,$$

где  $v$  - коэффициент искажения;  $\varphi_1$  - угол сдвига по фазе между основными гар-

мониками тока и напряжения ЛЭМД. Причем для ПП с естественной коммутацией

$$\varphi_1 = \alpha + \gamma_k/2 ,$$

где  $\gamma_k$  - угол коммутации полупроводниковых вентилей ( $\gamma_k < 30$  эл. град). Применение УПУ, работающих по данному способу, оправдано для привода ПО сравнительно большой мощности, когда необходимы формирование требуемого закона изменения напряжения ЛЭМД за цикл, а также рекуперация остаточной магнитной энергии в источник.

Следовательно, для обеспечения предельной простоты и надежности УПУ, а также высоких энергетических показателей привода наиболее целесообразным является режим работы преобразователя ПП с углом управления, близким к нулю или изменяющимся в небольшом диапазоне. Это позволит либо вовсе исключить СИФУ из состава УУ, либо значительно упростить его. Упрощение обусловлено возможностью совмещения функций отдельных узлов СИФУ в одном устройстве, а также невысокими требованиями к симметрии управляющих импульсов [12].

Таким образом, регулировать выходные параметры импульсных ЛЭМД возможно путем изменения амплитуды и длительности импульса напряжения на обмотке за счет небольшого изменения фазы его появления с использованием упрощенной СИФУ, а также путем изменения длительности импульса напряжения при неизменной его амплитуде без использования СИФУ. При этом целесообразно использовать форсированное аккумулирование магнитной энергии ЛЭМД, которое позволит снизить его материалоемкость, повысить удельную энергию рабочего хода [18; 19; 50].

Рассмотрим способы регулирования энергии рабочего хода и полезной работы, которые нашли применения в приводе ПО с импульсными ЛЭМД.

Способ плавного регулирования полезной работы основан на изменении фазы включения тиристора, входящего в состав ПП, во время первого и единственного полупериода напряжения источника. При этом изменяется не только длительность импульса напряжения обмотки, но и его амплитуда. Диапазон из-



менения угла  $\alpha$  обычно не превышает 90 эл. град. Недостаток способа - низкий коэффициент мощности ПП, а также неравномерная загрузка фаз источника. Данный способ разработан нами для питания и управления ЛЭМД усилием до 8...10 кН и энергией удара до 20 Дж от однофазного источника и реализован в устройствах [170; 171; 200].

Другой способ ступенчатого регулирования энергии удара осуществляют изменением длительности подачи управляющего сигнала на включение тиристор преобразователя ПП в моменты их естественной коммутации, то есть при  $\alpha = 0$ . Следовательно, коэффициент мощности ПП высокий. Недостатком способа является ступенчатость регулирования энергии удара. Однако из-за своей простоты данный способ используют при построении УПУ наиболее часто [193].

Объединив положительные свойства этих двух способов, нами предложен способ комбинированного регулирования. Он заключается, с одной стороны, в плавном регулировании напряжения двигателя внутри полупериода источника, а, с другой, - в его ступенчатом регулировании с интервалом дискретности, меньшим  $T/2$ . Способ позволяет, в отличие от первого, получить диапазон плавного изменения длительности импульса напряжения на обмотке ЛЭМД больший, чем  $T/2$  и обеспечивает возможность подключения двигателя к источнику на любой необходимый интервал времени [103].

Рассмотренные способы регулирования при их реализации позволяют получить одиночный импульс напряжения, необходимый для совершения двигателем одиночного хода якоря двигателя с требуемыми выходными параметрами. Для некоторых технологических процессов требуются также непрерывные ходы и их серии с заданной частотой следования. Поэтому кроме режима одиночных ходов прессовое оборудование с ЛЭМД может работать в режимах непрерывных ходов или их серии с постоянной или изменяющейся частотой, а также в автоколебательном режиме.

Режим работы ПО с ЛЭМД определяет особенности регулирования и стабилизации частоты ходов. Для оборудования, работающего в режиме пресс-молота, иногда используют автоколебательный режим [12; 19]. Для него частота

ходов непостоянна и определяется параметрами двигателя, обрабатываемого материала, величиной отскока и другими факторами. Поэтому в качестве задающих устройств при регулировании частоты ходов используют различные по принципу действия датчики, сигналы, в которых возникают в зависимости от положения якоря, формы тока, величины индукции в рабочих зазорах и т.д. Преимуществом данного способа регулирования частоты ходов является устойчивость работы привода. К недостаткам относят узкий диапазон регулирования частоты ходов и ее нестабильность. И, наоборот, для ПО с ЛЭМД, работающего в режиме прессования, а также в составе робототехнических комплексов, часто требуется совершение ходов с неизменной частотой. Для этого способа программного регулирования частоты ходов в качестве задающих устройств используют временные задающие блоки.

Сравнивая оба способа регулирования частоты ходов, отметим, что способ программного регулирования реализуется проще, так как не требует использования сигналов обратных связей. Кроме того, он позволяет получить широкий диапазон регулирования и высокую стабильность. К недостаткам его относят возможность появления неустойчивого режима, сбои в работе. При реализации способа программного регулирования частоты ходов в качестве задающей частоты используется частота промышленной сети  $f_{\text{и}}$  (источника). Обычно частота ходов ЛЭМД в приводе ПО не выше частоты напряжения источника. Поэтому для регулирования целесообразно использовать способ деления частоты  $f_{\text{и}}$  источника. Он позволяет легко осуществить синхронизацию УПУ с источником, упростить устройство, повысив его точность. Недостатком является дискретность регулирования. Так, для однообмоточного ЛЭМД частота ходов в минуту  $n$  связана с частотой  $f_{\text{и}}$  выражением:

$$n = 60 f_{\text{и}} / k_{\text{д}},$$

где  $k_{\text{д}} = 1, 2, 3, \dots, l$  – коэффициент деления;  $l$  – целое число, задающее нижнюю границу  $n$ .

В конкретных разработках УПУ в качестве делителей частоты с переменным коэффициентом деления используют цифровые счетчики импульсов, а

также наиболее простые и надежные цепи с конденсаторами, заряжаемые от полуволн напряжения сети. Последние нами были использованы и при создании УПУ ЛЭМД ПО [103-105].

**Реализация одного из способов регулирования полезной работы ЛЭМД.** Рассмотрим УПУ с дискретным регулированием полезной работы за цикл. Время рабочего хода якоря импульсного ЛЭМД усилием свыше 8-10кН и энергией удара свыше 20Дж обычно превосходит длительность полупериода напряжения источника. Электромагнитные постоянные времени таких двигателей значительны и составляют десятки миллисекунд. Например, если для ЛЭМД усилием 8кН эта постоянная равна 6 мс, то у ЛЭМД усилием 30кН она достигает 50мс. Поэтому использовать УПУ, построенные по способу плавного регулирования питающего напряжения внутри полупериода напряжения источника, затруднительно и нежелательно из-за электромагнитной совместимости.

Увеличить полезную мощность и длительность импульса тока через обмотку ЛЭМД до требуемого значения позволяет использование в качестве источника энергии трехфазной сети, в качестве способа регулирования – ступенчатое регулирование энергии рабочего хода.

Известное УПУ, реализующее этот способ [193], содержит в качестве полупроводникового преобразователя трехфазный тиристорный однополупериодный выпрямитель, к его выходным зажимам подключена обмотка ЛЭМД. Недостатком данного УПУ является низкая надежность работы, связанная с отсутствием при рабочем ходе якоря двигателя синхронизации по фазе между напряжением сети и началом разряда конденсатора, то есть моментом появления тока в обмотке ЛЭМД. Так как этот момент определяется только моментом нажатия кнопки пуска, то мгновенное значение напряжения, при котором включается первый из тириستоров выпрямителя, может изменяться от амплитудного значения до его половины. Это вызывает неодинаковую длительность  $\gamma_1$  импульса питающего напряжения на обмотке ЛЭМД при неизменной длительности тока разряда времязадающего конденсатора, что, в свою очередь, вызывает нестабильность усилия и энергии рабочего хода.

Оценим влияние диапазона регулирования длительности импульса питающего напряжения на нестабильность этой длительности в случае применения известного УПУ. С целью упрощения анализ проведем без учета коммутационных процессов в выпрямителе и гашения остаточной энергии магнитного поля. Выразим длительность импульса через количество  $n_l$  шагов дискретности, равных  $T/m_l$  каждый. С учетом схемы выпрямителя ( $m_l=3$ ) получим:

$$\gamma_1 = T/12 + n_l \cdot T/3, \quad (7.13)$$

где  $n_l = 1, 2, 3, \dots, l_l$ ;  $l_l$  - целое число, задающее верхнюю границу  $\gamma_1$ .

За оценку нестабильности  $\Delta$  длительности импульса примем отношение шага дискретности  $T/3$  к длительности  $\gamma_1$  этого импульса, полагая, что при одной и той же длительности разряда времязадающего конденсатора максимальное отклонение длительности питающего импульса равно одному шагу дискретности. С учетом (7.13) получим выражение максимальной нестабильности

$$\Delta = 1/(0,25 + n_l). \quad (7.14)$$

Анализ (7.14) показывает, что нестабильность известного УПУ (кривая 1 на рисунке 7.14) при прочих неизменных условиях обусловлена длительностью  $\gamma_1$  импульса или количеством  $n_l$  шагов дискретности, определяемых диапазоном регулирования. Например, при  $n_l = 1$  величина  $\Delta$  максимальна и составляет 80% от  $\gamma_1$ , а при  $n_l = 10$  - 9,76%.

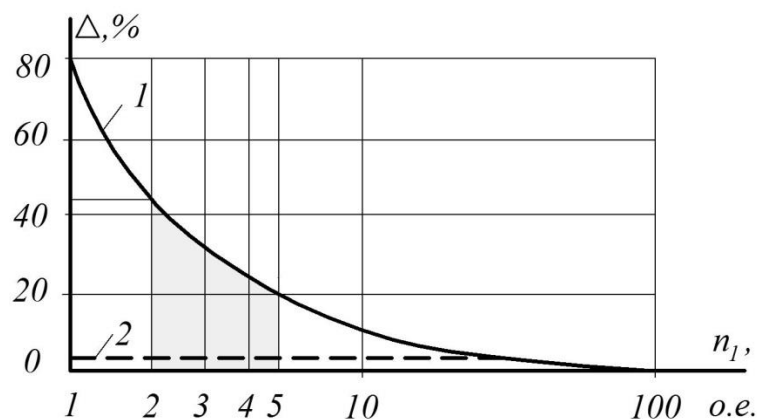


Рисунок 7.14 – Зависимости максимальной нестабильности длительности питающего импульса от его длительности для УПУ  
(1 – без синхронизации, 2 – с синхронизацией)

Следовательно, для уменьшения  $\Delta$  известное УПУ рационально исполь-

зовать лишь для получения сравнительно широких импульсов. Однако, даже при  $n_I = 10$  нестабильность остается достаточно высокой.

На практике для обеспечения заданной энергии рабочего хода известное УПУ требует увеличения длительности питающего импульса, что вызывает повышенный нагрев обмотки ЛЭМД и снижает его надежность. Образующийся при этом избыток механической энергии при совершении рабочего хода вызывает брак, увеличивает износ двигателя, шум при работе и также снижает надежность.

Радикальным средством уменьшения нестабильности  $\Delta$  является синхронизация момента появления тока в обмотке относительно напряжения источника. Разработанные нами УПУ с синхронизацией (УПУ-3С [104], УПУ-3СО [105]), не имеют большинства из отмеченных недостатков.

Устройство УПУ-3СО, принципиальная электрическая схема которого представлена на рисунке 7.15, предназначено для питания и управления ЛЭМД усилием свыше 8-10 кН в приводе ПО и позволяет регулировать усилие и энергию его рабочего хода. Питание привода производится от трехфазной промышленной сети с нейтральным проводом. Фазировка УПУ-3С при его подключении не требуется. Пресс управляется с помощью кнопки SB1. Энергию рабочего хода ЛЭМД регулируют переменным резистором R1. При нажатии кнопки SB1 начнется разряд конденсатора C1 не сразу после нажатия, а после прихода на управляющий электрод тиристора VS1 первого синхронизирующего импульса напряжения. Один из силовых тириستоров включается, в обмотке ЛЭМД возникает ток, и совершается рабочий ход. После окончания разряда конденсатора C1 проводящий тиристор выпрямителя за счет естественной коммутации закрывается.

Остаточная энергия, запасенная в магнитной цепи ЛЭМД, преобразуется в электрическую и рассеивается в виде тепла в резисторе R7, обмотке и диоде VD8, а также рекупируется через закрывающийся силовой тиристор в источник и одновременно при движении якоря преобразуется в механическую энергию рабочего хода.

Обратный ход пресса совершается за счет энергии возвратной пружины. При отпускании кнопки  $SB1$  конденсатор  $C1$  заряжается вновь, после чего цикл может быть повторен.

Длительность импульса питающего напряжения определяется выражением (7.13). Энергия рабочего хода ЛЭМД при уменьшении сопротивления резистора  $R1$  ступенчато падает, при увеличении - возрастает.

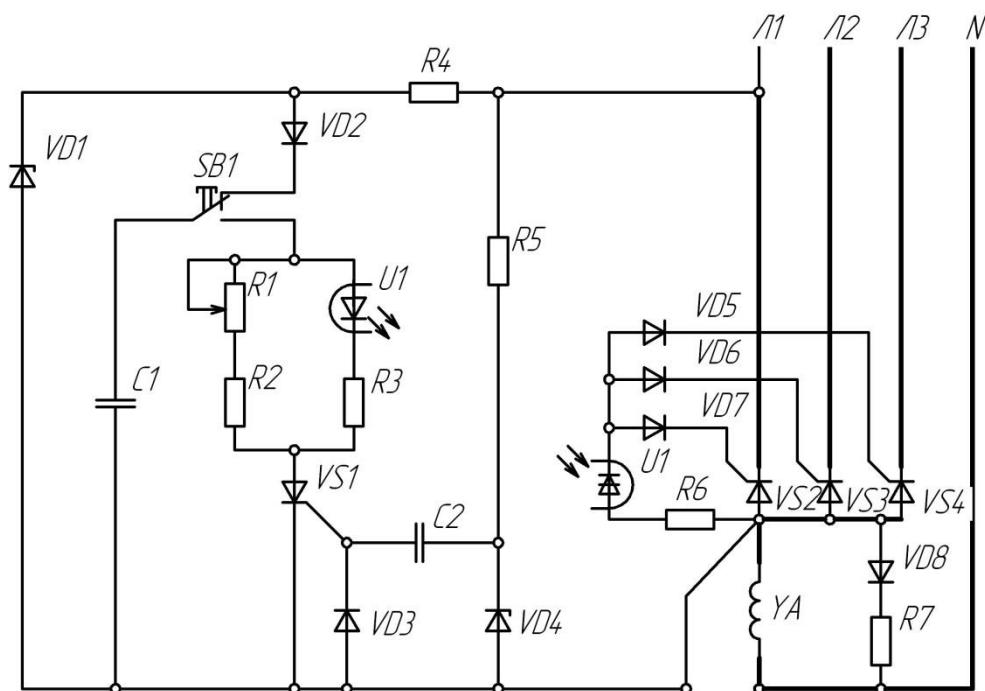


Рисунок 7.15 – Схема электрическая принципиальная устройства УПУ-3СО[105]

Отличие УПУ-3СО от УПУ-3С заключается в управлении анодной группой силовых тиристоров  $VS2-VS4$  через фототиристор оптрона  $U1$  и анодную группу диодов  $VD5-VD7$  от анодного напряжения силовых тиристоров выпрямителя. Благодаря такому управлению выпрямителем токи через управляющие переходы силовых тиристоров проходят только при прямых напряжениях на каждом из них и возникают в моменты естественной коммутации. После включения одного из силовых тиристоров его анодное напряжение падает и составляет единицы вольт, поэтому ток через управляющий переход практически отсутствует. В результате повышается надежность работы силовых тиристоров и облегчается тепловой режим их управляющих переходов. Кроме того, для обеспечения одной и той же длительности  $\gamma_1$  импульса питающего напряжения в

рассматриваемом УПУ требуется времязадающий конденсатор с меньшей на порядок емкостью, нежели у устройства УПУ-3С.

Принцип формирования выдержек времени, используемый в устройствах УПУ-3С и УПУ-3СО, основан на изменении напряжения на входе порогового устройства при апериодическом разряде конденсатора. В работе [9] получены выражения для определения оптимального значения эквивалентного сопротивления и емкости конденсатора. Это сопротивление обеспечивает наилучшее использование конденсатора (при заданной емкости получается максимальная выдержка времени).

Оценим нестабильность длительности импульса питающего напряжения  $\Delta'$  рассмотренных УПУ с синхронизацией. Если принять, что для них максимальное отклонение длительности равно половине длительности синхронизирующего импульса напряжения  $u_1$ , составляющей, как показывает эксперимент, не более 3 эл. град., то, используя выражение (7.14), получим аналогичное выражение для УПУ-3С и УПУ-3СО:

$$\Delta' = \frac{T/120}{T/12 + (T/3)n_1} = \frac{1}{10 + 40n_1} = \frac{\Delta}{40}. \quad (7.15)$$

Откуда следует, что максимальная нестабильность УПУ с синхронизацией снизилась в 40 раз. Зависимость  $\Delta'$  от диапазона регулирования показана на рисунке 7.14 (кривая 2). Например, используя последнее выражение, получим для длительностей импульса питающего напряжения  $2,083T$  и  $3,083T$ , соответствующих диапазонам регулирования с  $n_1 = 6$  и  $n_1 = 9$ , максимальную нестабильность 0,4 и 0,27% соответственно. УПУ, выполненное по [193] без синхронизации, обеспечивает в этом случае согласно (7.14) худшие показатели нестабильности, равные 16 и 10,8%.

Следовательно, рассмотренные УПУ с дискретным регулированием обеспечивают постоянство длительности импульса тока в обмотке ЛЭМД в более широком диапазоне регулирования. В результате повышается стабильность усилия и энергии рабочего хода пресса, снижается до необходимой величины длительность импульса тока в обмотке, что облегчает ее тепловой ре-

жим.

Производственные и лабораторные испытания УПУ-3С и УПУ-3СО с синхронизацией и дискретным регулированием подтвердили их технические преимущества. Устройство УПУ-3С внедрено на Саратовском авиационном заводе в составе ПО с ЛЭМД типа ПЭМ-3,0 на технологической операции выдавливания при производстве товаров народного потребления. С появлением современной элементной базы появилась возможность использовать силовые транзисторы, что значительно упрощает УПУ [194; 195].

### 7.2.2 Исследование стабилизирующих свойств УПУ

Исследование стабилизирующих свойств УПУ проведем на примере УПУ с комбинированным регулированием полезной работы. Если по технологическим условиям требуется плавное изменение полезной работы, то для импульсных ЛЭМД усилием свыше 10 кН и энергией удара свыше 20 Дж применение УПУ-3С и УПУ-3СО не позволяет обеспечить плавное изменение длительности импульса тока через обмотку двигателя в пределах шага дискретности, равного  $T/3$ . Это ограничивает технологические возможности машины ударного действия. Поэтому для обеспечения заданного уровня механической работы двигателя с указанными УПУ в некоторых случаях вынужден работать с избыточной длительностью импульса тока через его обмотку, что снижает надёжность и КПД электромагнитного привода.

Для устранения указанных недостатков нами разработано универсальное устройство УПУ-3 [103], реализующее способ комбинированного регулирования (Рисунок 7.16). Устройство содержит рассмотренные выше узлы: ФИ, узел синхронизации, выпрямитель, времязадающий конденсатор  $C3$  с цепями заряда и разряда. Отличие состоит в том, что в УПУ-3 введена схема совпадения на оптронах  $U1$  и  $U2$ . Она воздействует на включение выпрямителя, которое происходит после нажатия на кнопку пуска  $SB1$  не в момент прихода синхроимпульса, а с задержкой, равной углу управления  $\alpha$ . Величина его, как установлено в [170;



171; 200], изменяется от 15 до 160 эл. град. и регулируется резистором  $R6$ . Исходный интервал  $\gamma_1$  длительности импульса питающего напряжения согласно (7.13) устанавливается резистором  $R8$ .

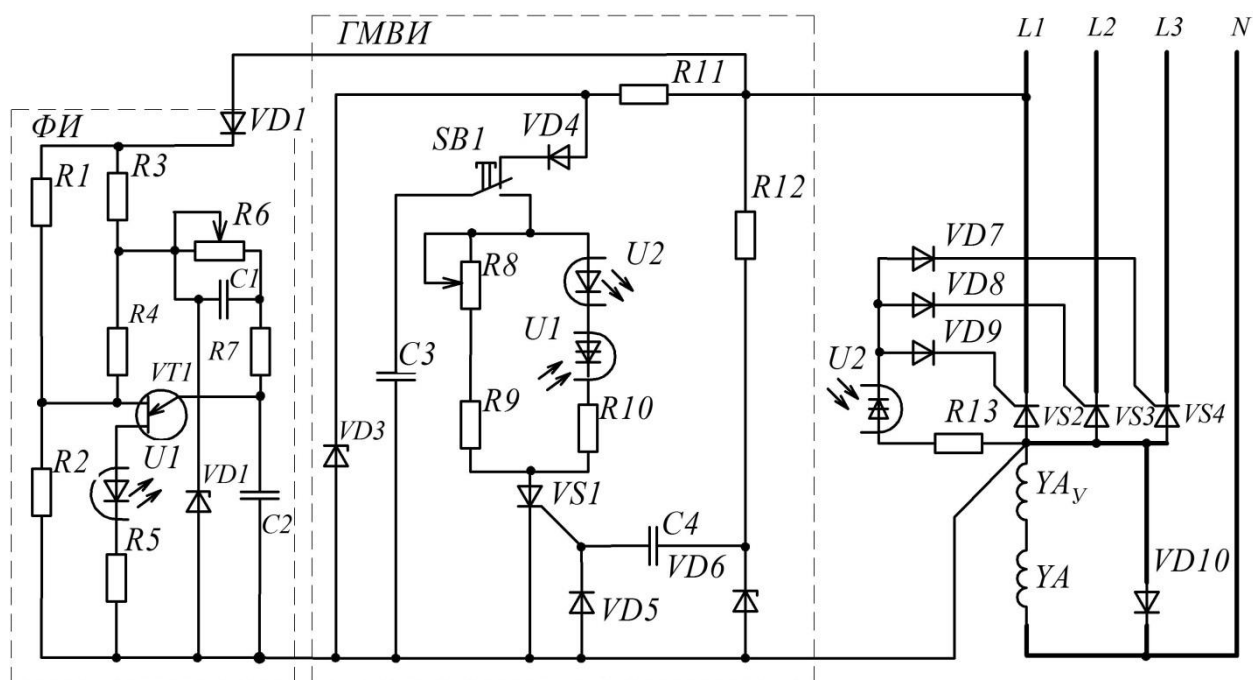


Рисунок 7.16 – Универсальное устройство УПУ-3 для ЛЭМД с встроенным устройством удержания якоря [103]

Оценим регулировочные свойства УПУ-3. Так как диапазон плавного изменения момента появления импульса напряжения на обмотке относительно начала периода напряжения сети перекрывает шаг дискретности ступенчатого изменения момента окончания этого импульса, то при одновременном изменении сопротивления резисторов  $R6$  и  $R8$  всегда найдется такое соотношение их сопротивлений, при котором будет обеспечен любой, наперед заданный интервал длительности  $\gamma_2$  импульса питающего напряжения. Например, заданный (без учета гашения остаточной магнитной энергии двигателя) интервал  $\gamma_2$ , равный 320 эл. град., реализуем в УПУ-3 так. Сначала резистором  $R8$  установим такое число  $n_1$  шагов дискретности, которое позволит получить исходный интервал  $\gamma_1$ , бóльший  $\gamma_2$  на величину, не превышающую диапазона плавного регулирования формирователя ФИ (в данном случае не более  $T/2$ ):

$$n_1 = [\gamma_2 / (T/3)] + 1 = [320/120] + 1 = 3,$$

где  $[\gamma_2 / (T/3)]$  – целая часть дроби  $\gamma_2 / (T/3)$ . Тогда  $\gamma_1$  с учетом (7.13) равна

$\gamma_1 = T/12 + (T/3) \cdot n_1 = 390$  эл. град. Затем резистором  $R_6$  установим необходимый угол  $\alpha$  как разность длительностей исходного и заданного интервалов:

$$\alpha = \gamma_1 - \gamma_2 = 390 - 320 = 70 \text{ эл. град.}$$

Для сравнения: устройства УПУ-3С или УПУ-3СО могут обеспечить получение питающего импульса длительностью либо 270, либо 390 эл. град. И этот результат не изменился бы при отработке импульса длительностью, например,  $\gamma_2 = 340$  эл. град. Тогда как в рассматриваемом УПУ-3 отработка такого импульса возможна при условии  $\alpha = \gamma_1 - \gamma_2 = 390 - 340 = 50$  эл. град. за счет изменения сопротивления резистора  $R_6$  при неизменном значении  $R_8$ .

Таким образом, разработанное УПУ-3, сочетая в себе достоинства устройств УПУ-1 [170; 171] и УПУ-3СО [103], позволяет точно дозировать полезную работу мощных импульсных ЛЭМД и является универсальным для привода ПО с ЛЭМД с полезной работой более 20Дж и усилием в конце рабочего хода более 10кН.

В соответствии с технологическими требованиями энергия рабочего хода ЛЭМД не должна изменяться. Нами установлено, что основными причинами нестабильности энергии могут быть следующие: изменения напряжения источника (например, сети переменного тока) [201- 203], отсутствие синхронизации УПУ с этой сетью [18; 19; 103; 104; 170; 171; 200], предыстория намагничивания магнитной системы импульсного ЛЭМД [204; 205]. Один из путей радикального уменьшения нестабильности длительности импульса, питающего обмотку ЛЭМД напряжения за счет применения в УПУ синхронизации был рассмотрен в п.7.2.1. Но стабильность длительности этого импульса еще не означает постоянства энергии удара в случае изменения амплитуды  $U_m$  напряжения сети. Очевидно, что с ростом  $U_m$  при неизменной длительности импульса энергия удара будет расти, а при снижении  $U_m$  — уменьшаться.

Применение известных стабилизаторов напряжения неэффективно и потребует значительного завышения их габаритной мощности, так как они не рассчитаны на импульсный режим работы, характерный для электромагнитного привода. Поэтому УПУ сами должны обладать стабилизирующими свойствами.

Целесообразно использовать способ стабилизации, реализованный в разработанных нами устройствах [103; 104; 170; 171], основанный на коррекции длительности импульса напряжения, питающего обмотку ЛЭМД, за счет изменения угла управления.

Сущность способа рассмотрим на примере УПУ-3 (Рисунок 7.16). Способ основан на свойстве однопереходного транзистора (ОПТ)  $VT1$  изменять напряжение своего включения, то есть и угла  $\alpha$ , при изменении междубазового напряжения, снимаемого с резистора  $R2$ . Он является одним из плеч резистивного делителя напряжения, который через диод  $VD2$  подключен к питающей сети напряжением  $U_c$ . Указанная особенность транзистора в сочетании со схемой его подключения к питающей сети обеспечивает стабилизацию заданной энергии удара ЛЭМД путем коррекции угла  $\alpha$  от изменения уровня напряжения сети. При изменении последнего изменяется уровень междубазового напряжения ОПТ, что приводит к такому изменению момента включения фототиристора оптрона  $U2$ , определяемого углом  $\alpha$ , при котором, например, среднее значение импульса питающего напряжения на обмотке ЛЭМД не выходит за пределы заданной неустойчивости. Так, при уменьшении напряжения сети угол  $\alpha$  уменьшается, а длительность питающего обмотку импульса напряжения несколько возрастает. При этом путем подбора соотношений сопротивлений плеч делителя можно получить полную независимость энергии рабочего хода ЛЭМД от изменения уровня сетевого напряжения в определенном диапазоне наиболее вероятных изменений заданных значений энергии удара [170].

Оценить влияние изменения напряжения сети на угол управления можно с помощью выражения [170]:

$$\alpha = \frac{2\pi}{T} \cdot (R6 + R7) \cdot C2 \cdot \ln \frac{1 - U_{\text{выкл}} / U_{\text{ИП}}}{1 - k_{VT} \cdot \left( \frac{R2}{R4} + \frac{R2}{R1} \cdot \frac{U_c}{U_{\text{ИП}}} \right) \left( 2 + \frac{R2}{R4} + \frac{R2}{R1} \right)} \quad (7.16)$$

На рисунке 7.17 показаны зависимости угла  $\alpha$  от относительного напряжения сети  $U_{c*} = U_c / 220 = U_m \cdot \sin \alpha / 220$  при различной глубине обратной связи по напряжению сети, изменяемой резистором  $R1$ . Сплошные линии соответствуют

$R1=100$  кОм, пунктирные –  $R1=130$  кОм. Более глубокой обратной связи ( $R1=100$  кОм) соответствует больший диапазон изменения  $\alpha$ . С помощью выражения (7.16) согласно [170] получим семейство расчетных зависимостей  $U_{ср*} = U_{ср} / U_{ср.ном}$  (Рисунок 7.18) при различных значениях  $R6$  и  $R1$ , аналогичных приведенным на рисунке 7.17.

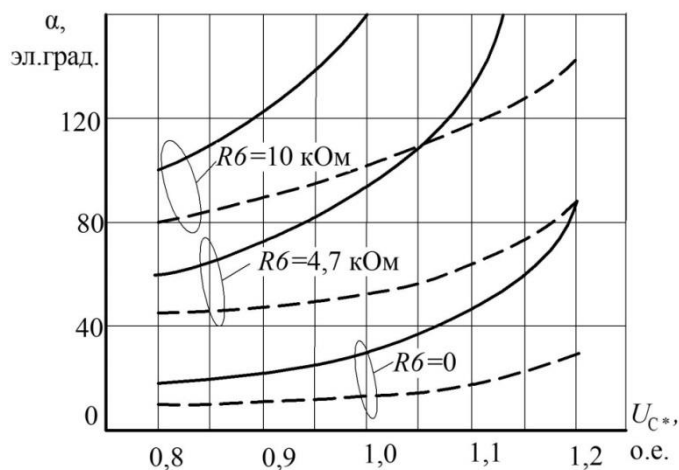


Рисунок 7.17 – Влияние напряжения источника УС на угол управления  $\alpha$  при различной глубине обратной связи устройства УПУ-1 [170] и УПУ-3 [103] (сплошные –  $R1=100$ кОм, пунктирные –  $R1=130$ кОм)

Характер зависимостей напряжения на обмотке ЛЭМД от напряжения сети, как видно из рисунка 7.18а, определяется  $R1$  и  $R6$  и более благоприятен при их рациональных значениях ( $R1=130$  кОм,  $R6=4,7$  кОм).

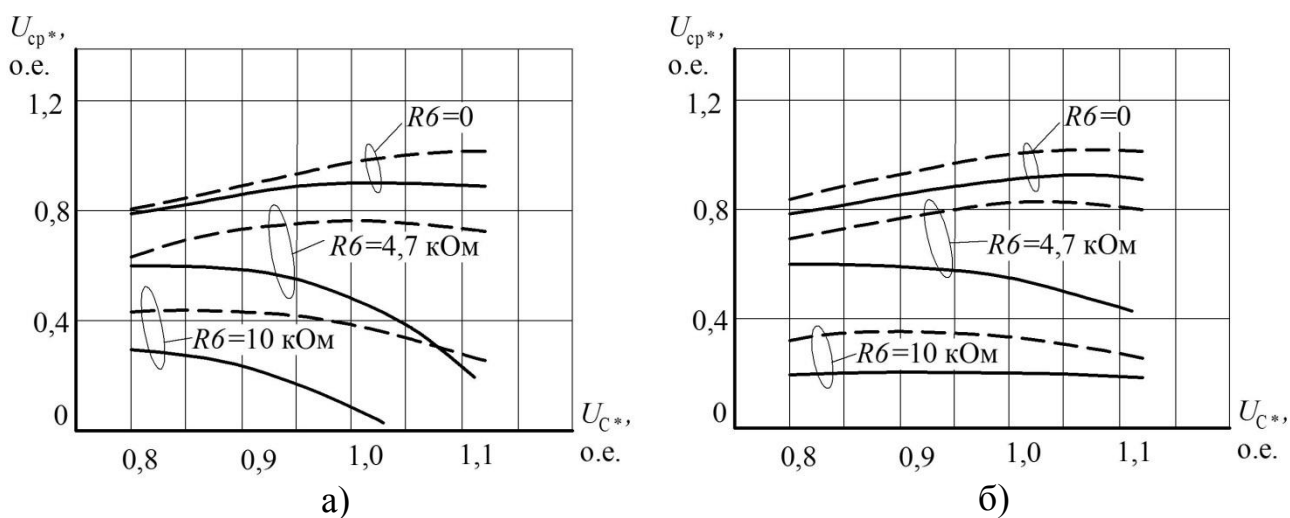


Рисунок 7.18 – Влияние напряжения источника  $U_c$  на среднее значение напряжения  $U_{ср}$  при его регулировании (а – расчет; б – эксперимент)

Подобные зависимости, снятые экспериментально, приведены на рисун-

ке 7.18 б. Они подтверждают возможность использования предложенного способа стабилизации энергии удара. Из рисунка 7.18 б следует, что при изменении напряжения сети в пределах  $\pm 10\%$  коэффициент стабилизации устройства изменяется в зависимости от величин сопротивлений  $R_1$  и  $R_6$  от 1,3 до 2,6. Стабилизирующие свойства УПУ возрастают с увеличением среднего значения напряжения на ЛЭМД. Рекомендуемый диапазон изменения величины  $R_6$ : 0...4,7 кОм при  $R_1 > 56$  кОм.

С помощью разработанного нами контактного датчика предударной скорости бойка [166] выполнена оценка стабильности энергии удара импульсного ЛЭМД, питаемого от устройства УПУ-3. Согласно [206] среднеквадратичная ошибка такого контактного датчика составляет не более 0,6%. Экспериментальные исследования подтвердили возможность стабилизации энергии удара с отклонением 2...5% при изменении напряжения сети  $U_c$  в диапазоне  $\pm 10\%$  от номинального значения. Тогда как аналогичное устройство УПУ без стабилизации вызывает отклонение энергии удара в 19...21%, что не приемлемо для ряда технологических операций (например, завальцовка корпусов химических источников тока, клеймение, вырубка слюды и т.п.).

Данный способ стабилизации использован также в созданных нами устройствах для управления двухобмоточным ЛЭМД [197] и в электровиброприводе [198].

В разработанных УПУ удалось, сохранив широкий диапазон изменения полезной работы ЛЭМД, обеспечить одновременно ее стабилизацию от возмущений, вызванных изменением уровня напряжения источника питания. Это позволяет исключить избыток энергии удара и устранить преждевременный износ элементов двигателя и пресса, повысить надежность и снизить шум. УПУ-1 [170; 171] испытано в приводе с ЛЭМД усилием 5кН (режим одиночных и непрерывных ходов) и усилием 8кН (ражим одиночных ходов) для ПО на штамповке конденсаторной слюды и сборочно-заготовительных операциях машиностроительных предприятий и внедрено на Омутнинском металлургическом заводе в составе электромагнитного привода на технологической операции про-

колки отверстий при производстве изделий из оцинкованного листа.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к УПУ, проведено сравнение разработанных нами устройств питания и управления импульсными ЛЭМД (Таблица 7.2).

Таблица 7.2 – Основные показатели разработанных УПУ

Тип УПУ	Показатели				
	Режим работы привода	Диапазон регулирования полезной работы, Дж	Плавность регулирования полезной работы за цикл	Диапазон регулирования частоты ходов, мин <sup>-1</sup>	Стабилизация полезной работы за цикл
Однофазные УПУ					
УПУ-1	одиночные и непрерывные ходы	0-20	есть	0-500	есть
УПУ-1В	непрерывные ходы	0-10	есть	0-3000	есть
Трёхфазные УПУ					
УПУ-3С	одиночные ходы	0-1000	нет	нет	нет
УПУ-3СО	одиночные ходы	0-1000	нет	нет	нет
УПУ-3	одиночные ходы	0-1000	есть	нет	есть
УПУ-3СС	одиночные и непрерывные ходы	0-1000	нет	0-300	нет

В качестве критериев оценки УПУ приняты следующие показатели: режим работы привода с ЛЭМД, диапазоны регулирования полезной работы и частоты ходов, плавность регулирования полезной работы и возможность её стабилизации. УПУ, обладающие перечисленными свойствами, позволяют создать универсальное оборудование с регулируемыми ЛЭМД для различных импульсных технологий.

Таким образом, обоснованы рациональные способы регулирования выходных параметров импульсных ЛЭМД за счет изменения длительности и частоты питающих импульсов с помощью разработанных УПУ для ЛЭМД с полезной работой до 1000 Дж, частотой ходов до 600 мин<sup>-1</sup>., работающих в режимах одиночных и непрерывных ходов.

Так же была проведена оценка стабильности полезной работы импульсного ЛЭМД и предложены устройства УПУ, дополненные узлами фазового управ-

ления и обеспечивающие компенсацию дестабилизирующих факторов за счет синхронизации момента появления питающего импульса относительно напряжения источника и автоматической коррекции фазы этого импульса.

### **7.3 Питание передвижных установок с импульсными ЛЭМД от емкостных накопителей**

В качестве источника оперативного постоянного тока на подстанциях, а так же источника энергии для импульсных линейных электромагнитных двигателей, используемых в качестве привода вакуумных выключателей, представляют интерес емкостные наполнители энергии (ЕНЭ) в виде батарей конденсаторных модулей, обладающих значительным ресурсом по сравнению с аккумуляторными батареями [207-210]. При заряде такого накопителя от сети переменного тока возникают значительные броски тока, ухудшающие показатели качества электрической энергии. Для ограничения мощности зарядного цикла и обеспечения электромагнитной совместимости в состав зарядного устройства включают токоограничивающие элементы. Если в качестве такого элемента используется резистивный элемент, то КПД заряда, равный отношению запасенной в накопителе электрической энергии  $W_{\text{нак}}$  к потребленной из сети за время заряда  $W_{\text{потр}}$ , не будет превышать 0,5 [211], что неэффективно. Использование в качестве токоограничивающего индуктивного элемента [212-214] может существенно повысить КПД заряда при допустимом максимальном зарядном токе, потребляемом от источника, например, от промышленной сети.

Определим и проанализируем динамические и энергетические характеристики процесса заряда ЕНЭ с индуктивным токоограничивающим элементом для выявления требований к зарядному устройству.

Схема замещения цепи заряда показана на рисунке 7.19. Резистивный элемент  $R$  характеризует тепловые потери в цепи заряда, токоограничивающий индуктивный элемент  $L$  может быть нелинейным. Другим нелинейным элементом будет выключатель  $SB$ . Источник выпрямленного напряжения имеет среднее значение  $E$ . Ключ  $SB$  – тиристоры или силовые транзисторы.

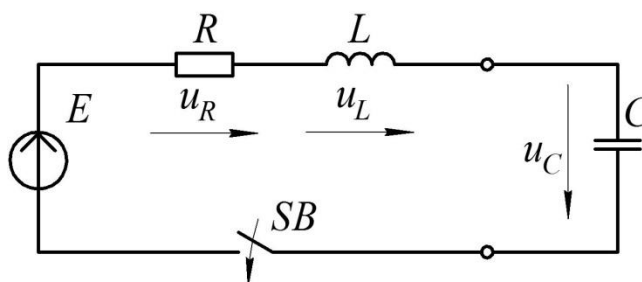


Рисунок 7.19 – Схема замещения цепи заряда ЕНЭ

Примем при анализе  $L = \text{const}$ . Для оценки характеристик заряда ЕНЭ будем контролировать напряжение  $u_C(t)$  на ЕНЭ и ток его заряда  $i(t)$  при  $t \geq 0$  после замыкания ключа  $SB$ .

С помощью второго закона Кирхгофа для  $t \geq 0$  применительно к схеме замещения (Рисунок 7.19) получим дифференциальное уравнение, которое сведем к известному виду [211]:

$$\frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{du_C(t)}{dt} + \frac{1}{LC} u_C(t) = E.$$

Для быстрого заряда ЕНЭ необходимо обеспечить его колебательный (периодический) процесс, который будет при условии [211]:

$$R < 2 \cdot \sqrt{L/C}.$$

В этом случае круговая частота  $\omega_0$  свободных колебаний с затухающей по экспоненте амплитудой и коэффициент затухания  $\delta$  будут соответственно

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}; \quad \delta = \frac{R}{2L}. \quad (7.17)$$

Для закона изменения напряжения на ЕНЭ при его заряде [211]:

$$u_C(t) = E + A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \psi)$$

найдем постоянные интегрирования  $A$  и  $\Psi$  с учетом начальных условий  $i(0) = 0$  и  $u_C(0) \neq 0$ , когда  $u_C(0)$  не менее  $0,25 E_{\text{пред}}$  по техническим условиям на конденсаторные модули типа ЭК производства ЗАО «ЭЛТОН» [207]:

$$A = -\frac{E - u_C(0)}{\sin \psi}; \quad \psi = \arctg \frac{\omega_0}{\delta}.$$

Тогда напряжение на ЕНЭ и его ток будут:



$$u_C(t) = E - \frac{E - u_C(0)}{\sin \psi} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 t + \psi); \quad (7.18)$$

$$i(t) = C \cdot \frac{(E - u_C(0)) \cdot e^{-\delta t}}{\sin \psi} \cdot [\delta \cdot \sin(\omega_0 t + \psi) - \omega_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \psi)]. \quad (7.19)$$

Представим выражения (7.18) и (7.19) в относительных единицах. За базисные величины примем  $E_B = E$  и  $I_B = E / \sqrt{L/C}$ . Кроме того, примем для цепи заряда отношение  $\omega_0/\delta = 10$ . Тогда выражение (7.17) для  $\omega_0$  упростится и примет вид:

$$\omega_0 = \sqrt{1/LC - 0,01 \cdot \omega_0^2} \approx \sqrt{1/LC},$$

из которого следует, что частота свободных затухающих колебаний при заряде ЕНЭ практически не отличается от собственной частоты цепи заряда. Это позволяет упростить выражения для относительных величин  $u_{C*}(\omega_0 t)$  и  $i_*(\omega_0 t)$ , например, при условиях  $\omega_0/\delta = 10$ ,  $u_{C*}(0) = 0,32$ ,  $\sin \psi = 0,995$ ;  $\psi = 1,47 \text{ рад}$  выражение (7.18) примет вид:

$$u_{C*}(\omega_0 \cdot t) = 1 - 0,683 e^{-0,1\omega_0 \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 t + 1,47). \quad (7.20)$$

Аналогично выразим (7.19) в относительных единицах:

$$i_*(\omega_0 t) = 0,0683 \cdot e^{-0,1\omega_0 \cdot t} \cdot [\sin(\omega_0 t + 1,47) - 10 \cos(\omega_0 t + 1,47)]. \quad (7.21)$$

Для значений  $L = 0,1 \text{ мГн}$  и  $C = 300 \text{ Ф}$  получим базисный ток, А:

$$I_B = \frac{E}{\sqrt{L/C}} = \frac{E}{\sqrt{1 \cdot 10^{-4} / 300}} = 1,73 \cdot 10^3 \cdot E.$$

Анализ (7.21) показывает, что первый максимум тока заряда имеет место в момент времени  $(\omega_0 t_m) = 1,472 \text{ рад} = 84,4^\circ$ . Для этого момента времени и, например, при ЭДС источника  $E = 56 \text{ В}$  найдем максимум тока заряда:

$$I_{\text{макс}} = I_{\text{макс}*} \cdot I_B = 0,5984 \cdot 1,73 \cdot 10^3 \cdot 56 = 57970 \text{ А}.$$

Такая амплитуда зарядного тока недопустима. Для её снижения необходимо уменьшить ЭДС источника заряда до величины, обеспечивающей ток заряда не более 10...12 А. Однако количество циклов заряда при этом возрастет и продолжительность заряда ориентировочно составит при токе  $I_{\text{доп}} = 10 \text{ А}$ :

$$t_{\Sigma \text{ зар}} = \left( \frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{доп}}} \right) \cdot T_{3.4} = \frac{57970}{10 \cdot 60} \cdot 1,09 = 96 \text{ минут},$$

$$\text{где } T_{3.4} \approx \frac{2\pi}{1/\sqrt{LC}} = 2\pi \cdot \sqrt{LC} = 2\pi \cdot \sqrt{10^{-4} \cdot 300} = 1,09 \text{ с.}$$

Если в течение первого периода заряда ЕНЭ прервать колебательный процесс в момент  $\omega_0 \cdot t_3$ , когда ток проходит через нуль, то напряжение  $u_C(\omega_0 t_3)$  будет максимально. С помощью выражения (7.21) находим этот момент времени  $\omega_0 t_3 = \pi \cdot k$ .

Для первого цикла заряда ( $k=1$ ) этот момент будет [212-214]:

$$t_3 = \pi / \omega_0. \quad (7.22)$$

Подставив значение  $\omega_0 \cdot t_3$  из (7.22) в (7.20), получим значение первого максимума напряжения на ЕНЭ:

$$u_{C*}(\omega_0 \cdot t_3) = 1 - [1 - u_{C*}(0)] \cdot e^{-\delta \cdot t_3}. \quad (7.23)$$

Например, при условиях  $\omega_0 / \delta = 10$ ,  $u_{C*}(0) = 0,32$  из (7.23) получим максимум при значении  $u_{C*}(\omega_0 \cdot t_3) = 1,496$ , что больше ЭДС источника заряда  $E$  почти на 50%.

Покажем, как зависит этот максимум напряжения от добротности цепи заряда  $Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$  [211]. Учтя, что  $\delta \cdot t_3 = \pi / 2Q$ , получим:

$$u_{C*}(\omega_0 \cdot t_3) = 1 + [1 - u_{C*}(0)] \cdot e^{-\frac{\pi}{2Q}}, \quad (7.24)$$

откуда следует, что с ростом добротности контура заряда растет максимум напряжения, приближающийся к значению  $2E$  [213; 214].

Найдем КПД заряда ЕНЭ за время  $t_3$  в течение первого периода заряда в виде отношения накопленной электрической энергии в накопителе  $W_{\text{нак}}$  к потребленной им за то же время  $W_{\text{потр}}$ :

$$\eta_1 = W_{\text{нак}} / W_{\text{потр}},$$

где  $W_{\text{нак}} = \frac{C \cdot [u_C^2(t_3)] - u_C^2(0)}{2}$ ;  $W_{\text{потр}} = \int_0^{t_3} E \cdot i(t) dt$ .

Потребленная за время от 0 до  $t_3$  энергия с учетом (7.22):

$$W_{\text{потр}} = C \cdot E(E - u_C(0)) \cdot (e^{-\pi\delta/\omega_0} + 1). \quad (7.25)$$

Накопленная в ЕНЭ энергия за время  $t_3$  с учетом (7.18):

$$W_{\text{нак}} = \frac{C}{2} [E^2 - u_C^2(0) + 2E(E - u_C(0)) \cdot e^{-\delta \cdot t_3} + (E - u_C(0))^2 \cdot e^{-2\delta \cdot t_3}]. \quad (7.26)$$

Тогда КПД первого периода заряда с учетом полученных выражений (7.25) и (7.26) будет:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + e^{-\pi\delta/\omega_0}} \cdot \left[ \frac{1 + u_{C^*}(0)}{2} + e^{-\pi\delta/\omega_0} + \frac{(1 - u_{C^*}(0))}{2} \cdot e^{-2\pi\delta/\omega_0} \right], \quad (7.27)$$

который при  $u_{C^*}(0) = 0,32$  примет вид:

$$\eta_1(\delta/\omega_0) = \frac{1}{1 + e^{-\pi\delta/\omega_0}} \cdot [0,66 + e^{-\pi\delta/\omega_0} + 0,34e^{-2\pi\delta/\omega_0}]. \quad (7.28)$$

По уравнению (7.28) построен график зависимости (Рисунок 7.20).

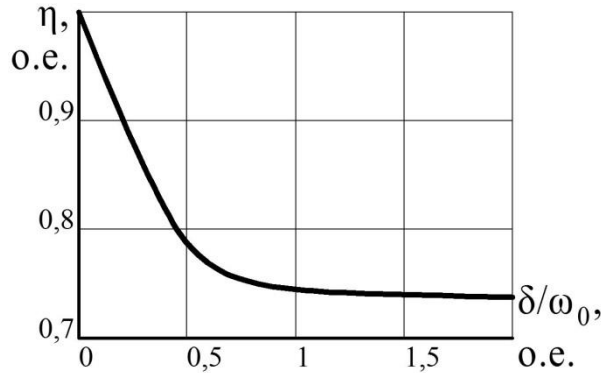


Рисунок 7.20 – Зависимость КПД заряда от добротности цепи

Анализ (7.28) показывает, что даже при ухудшении добротности цепи заряда КПД заряда не может быть ниже предела:

$$\eta_{\text{мин}} = \frac{1 + u_{C^*}(0)}{2},$$

который для выражения (7.28) будет  $\eta_{\text{мин}} = \frac{1 + 0,32}{2} = 0,66$ .

Следовательно, за счет повышения добротности цепи заряда и начального

напряжения ЕНЭ  $u_c(0)$  возможен заряд емкостных накопителей энергии за несколько циклов (периодов) с достаточно высоким КПД, причем с ростом  $u_c(0)$  КПД теоретически приближается к единице [213; 214].

Таким образом, для ограничения тока заряда ЕНЭ с индуктивным токоограничивающим элементом заряжать накопитель следует не за один, а за несколько циклов. Для повышения КПД заряда ЕНЭ его следует заряжать не с нулевого напряжения, а дозаряжать. Выполнение этого условия позволит иметь КПД заряда более 0,5 при любой добротности цепи заряда, а когда добротность выше 5, то КПД заряда стремится к единице. Для обеспечения высоких значений КПД заряда накопители с большим запасом энергии предпочтительнее дозаряжать за несколько циклов, тогда как недорогие накопители с небольшим запасом энергии должны обязательно иметь высокую добротность цепи заряда, и их можно зарядить за один цикл.

#### **7.4 Влияние импульсных ЛЭМД на колебания напряжения в электрической сети промышленного предприятия**

Спецификой импульсных ЛЭМД, используемых в приводе ударных машин, является импульсный характер энергопреобразования за рабочий цикл и, следовательно, электропотребления через устройство питания и управления от электрической сети промышленного предприятия. Для неё импульсный ЛЭМД является ударной нагрузкой с временем действия от 0,01 с до 0,2 с при потреблении тока до сотен ампер [9; 201; 202; 215; 216].

При небольшой мощности и энергии рабочего хода индивидуального электромагнитного привода импульсный характер электропотребления практически не сказывается на показателях качества электрической энергии (ПКЭ) [9; 217]. Однако при возрастании энергии рабочего хода такого привода или группы приводов с импульсными ЛЭМД с небольшой энергией рабочего хода в электрических сетях возникают недопустимые колебания в виде одиночных быстрых изменений напряжения. До сих пор отсутствуют достаточные эксперименталь-

ные и статистические результаты о влиянии импульсных ЛЭМД на ПКЭ при питании их от электрической сети через УПУ. В качестве силового преобразователя в УПУ обычно используют выпрямители, выполненные по известным однофазным и трёхфазным схемам [9; 12; 200].

В работе [9] определены диапазоны допустимых параметров сети и импульсного ЛЭМД при питании его от трёхфазной мостовой схемы выпрямления. Однако в ней приближенно выражен закон изменения амплитуды фазного тока при включении импульсного ЛЭМД и, как следствие, неточно определены эти диапазоны.

Уточним расчётным путём области допустимой работы импульсных ЛЭМД при их питании от электрической сети промышленного предприятия и определим рекомендации по расширению этих областей.

Исследуем условия питания импульсного ЛЭМД непосредственно от электрической сети. Допускаем, что для оценки относительного значения изменения напряжения, вызываемого резко переменной нагрузкой, можно воспользоваться известной формулой определения потери напряжения на участке сети, в результате получим [9; 201; 202; 217]:

$$\delta U, \% = \frac{\Delta P \cdot R_c + \Delta Q \cdot X_c}{U^2} \cdot 100 \%, \quad (7.29)$$

где  $\Delta P$ ,  $\Delta Q$  – соответственно изменения (колебания) активной и реактивной мощности, определяемые как разность между наибольшими значениями при набросе резко переменной нагрузки и значениями в предшествующем режиме [217];  $R_c$ ,  $X_c$  – активное и реактивное сопротивления сети;  $U = U_c$  – линейное напряжение сети, амплитуда которого не меняется.

Определим величины мощностей  $\Delta P$  и  $\Delta Q$  из анализа рабочего цикла импульсного ЛЭМД для выпрямителя в составе УПУ, выполненного по трехфазной мостовой схеме, и выразим эти мощности через параметры импульсного ЛЭМД, отнесенные к параметрам электрической сети [201; 202].

Импульсный ЛЭМД является двухступенчатым электромеханическим преобразователем электромагнитного типа, у которого на первой ступени энер-

гопреобразования (этапе трогания якоря) происходит возбуждение двигателя путём накопления магнитной энергии в рабочих зазорах двигателя за счёт электрической энергии источника при возрастающих потокоцеплении и токе двигателя. При достижении ими значений трогания и начала движения якоря наступает вторая ступень энергопреобразования. На ней механическая работа двигателя совершается как за счёт уже накопленной магнитной энергии, так и за счёт энергопреобразования поочерёдно по одному из энергетических режимов, рассмотренных в главе 4 [99 ; 124].

Соответствующая энергетическим режимам с возрастающим потокоцеплением диаграмма тока импульсного ЛЭМД, потребляемого от трёхфазной сети, представлена ниже (Рисунок 7.21). На диаграмме можно выделить три характерных участка. Участок  $0 - t_1$  (этап трогания якоря) соответствует процессу аккумуляции магнитной энергии в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД и реактивному току, потребляемому от сети.

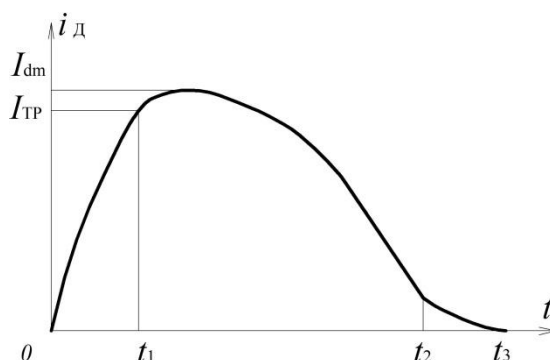


Рисунок 7.21 – Диаграмма тока импульсного ЛЭМД

На втором участке  $t_1 - t_2$  диаграммы происходит движение якоря и совершение механической работы. При этом ток, потребляемый от сети, обычно падает как за счёт возникающей противо-ЭДС движения, так и за счёт уменьшения запаса магнитной энергии и преобразования её в механическую энергию в соответствии с магнитным циклом, по которому функционирует двигатель.

Третий участок  $t_2 - t_3$  характерен затуханием тока двигателя под действием остаточной магнитной энергии, оказавшейся в магнитной системе импульсного ЛЭМД после окончания рабочего хода якоря.



жение тока фазы примет вид (Рисунок 7.22) для значения  $\omega \cdot T_3 = \pi$ :

$$i_\phi(\omega t) = \pm \frac{I_{уст}}{\omega \cdot T_3} (1 - e^{-\frac{\omega t}{\pi}}) = \pm \frac{U_d}{X_3} (1 - e^{-\frac{\omega t}{\pi}}), \quad (7.30)$$

где  $X_3 = \omega \cdot L_n$  – эквивалентное индуктивное сопротивление импульсного ЛЭМД со стороны сети на этапе трогания якоря.

Разложим кривую тока фазы (7.30) применительно к трёхфазной мостовой схеме выпрямления при угле управления  $\alpha = 0$  (без учёта процессов коммутации вентилей) на первом периоде  $0 \leq \omega t \leq 2\pi$  в ряд Фурье на синусную и косинусную составляющие, учтя только первую гармонику. Их значения будут соответственно [201; 202]:

$$\frac{U_d}{\pi \cdot X_3} \left[ \int_{\pi/6}^{5\pi/6} (1 - e^{-\frac{\omega t}{\pi}}) \sin(\omega t) d(\omega t) + \int_{7\pi/6}^{11\pi/6} -(1 - e^{-\frac{\omega t}{\pi}}) \sin(\omega t) d(\omega t) \right] = 0,624 \cdot \frac{U_d}{X_3};$$

$$\frac{U_d}{\pi \cdot X_3} \left[ \int_{\pi/6}^{5\pi/6} (1 - e^{-\frac{\omega t}{\pi}}) \cos(\omega t) d(\omega t) + \int_{7\pi/6}^{11\pi/6} -(1 - e^{-\frac{\omega t}{\pi}}) \cos(\omega t) d(\omega t) \right] = -0,058 \cdot \frac{U_d}{X_3}.$$

Интервал времени  $0 \dots 2\pi$ , равный периоду питающей сети, должен соответствовать продолжительности интервала трогания  $\Delta t$  для импульсных ЛЭМД, у которых время рабочего хода близко к 0,02 с. Это допущение полностью применимо для импульсных ЛЭМД с тяговым усилием до 10 кН и энергией рабочего хода до 100 Дж. К ним относятся, например, электромагнитные двигатели прессов ПЭМ-0,1 с усилием 1 кН, ПЭМ-0,2; ПЭМ-0,3; ПЭМ-0,5; ПЭМ-0,8 и ПЭМ-1,0 [9; 201; 202]. Для более мощных двигателей (двигатели пресса ПЭМ-3,0 с усилием до 30 кН) данное допущение также применимо при условии, если они функционируют в соответствии с режимами с падающими по ходу якоря токами (например, режим  $\psi = \text{const}$ ), у которых энергия рабочего хода более 100 Дж. Двигатели с бóльшей энергией рабочего хода (600-1000 Дж и более) необходимо питать от источника через промежуточный накопитель, например, ёмкостный [11; 117].

При оценочных расчетах допустимо учитывать только первую гармонику



при разложении тока фазы трёхфазного мостового выпрямителя. Это вносит погрешность менее 10% при определении, например, действующего значения тока по сравнению с определением такого же значения тока, но состоящего из гармоник, начиная с первой по пятую включительно,

Тогда амплитуда первой гармоники реактивного тока, потребляемого из сети на интервале  $0 \leq \omega t \leq 2\pi$ , будет:

$$I_{1m} = \frac{U_d}{X_\gamma} \cdot \sqrt{0,624^2 + 0,058^2} \approx 0,626 \cdot \frac{U_d}{X_\gamma}. \quad (7.31)$$

Переходя в (7.31) от амплитудного к действующим значениям реактивного тока  $I_p$  и линейного напряжения сети  $U_c$ , получим:

$$I_p = 0,6 \cdot \frac{U_c}{X_\gamma},$$

благодаря чему выразим на первом этапе изменение реактивной мощности при включении импульсного ЛЭМД в трёхфазную сеть с напряжением  $U_c$ :

$$\Delta Q = \sqrt{3} \cdot I_p \cdot U_c = 1,04 \cdot \frac{U_c^2}{X_\gamma}. \quad (7.32)$$

Изменение активной мощности  $\Delta P$ , как и реактивной, определим из диаграммы как максимальное значение мгновенной мощности при выпрямленном напряжении импульсного ЛЭМД за время рабочего хода [9; 201; 202].

$$\Delta P = U_d \cdot I_{dm} = 1,82 \cdot \frac{U_c^2}{R_\gamma}, \quad (7.33)$$

где  $R_\gamma = U_d / I_{dm}$  – эквивалентное расчётное активное сопротивление импульсного ЛЭМД со стороны сети переменного тока, определяемое через максимум активной мощности за время рабочего хода якоря.

Как отмечается в работах [9; 201; 202], потребление двигателем из сети реактивной и активной мощностей несколько разнесено во времени, однако для удобства расчетов возможно воспользоваться выражением (7.29), приняв одновременность этого потребления и тем самым несколько ужесточив требования к показателям качества электроэнергии. Тогда с учетом (7.32) и (7.33) выражение (7.29) примет вид:

$$\delta U, \% = 100 \cdot \left( 1,82 \cdot \frac{R_c}{R_\Sigma} + 1,04 \cdot \frac{X_c}{X_\Sigma} \right). \quad (7.34)$$

Если принять в выражении (7.34)  $\delta U\% = 5\%$  [218], то получим условие допустимого функционирования импульсного ЛЭМД в составе электромагнитного привода, питаемого непосредственно от сети общего назначения:

$$\frac{R_\Sigma}{R_c} \leq \frac{1,82}{0,05 - 1,04/(X_\Sigma / X_c)}. \quad (7.35)$$

Отношения  $\frac{R_\Sigma}{R_c}$  и  $\frac{X_\Sigma}{X_c}$  позволяют сравнивать параметры проектируемого двигателя ( $R_\Sigma$ ,  $X_\Sigma$ ) с параметрами питающей сети ( $R_c$ ,  $X_c$ ) с целью обеспечения их соответствия и определять область возможного функционирования импульсного ЛЭМД при питании его от сети переменного тока через трёхфазный мостовой выпрямитель без промежуточного накопителя.

Из анализа (7.35) следует, что с ростом эквивалентного индуктивного сопротивления  $X_\Sigma$  импульсного ЛЭМД его эквивалентное активное сопротивление  $R_\Sigma$  со стороны сети может быть уменьшено. Однако оно не может быть ниже предельного значения, определяемого из (7.35) и обусловленного активным сопротивлением  $R_c$  сети, и для случая трёхфазного мостового выпрямителя будет:

$$R_{\Sigma, \text{мин}} \geq \frac{1,82}{0,05} \cdot R_c \geq 34,6 \cdot R_c. \quad (7.36)$$

Аналогично, с ростом эквивалентного активного сопротивления  $R_\Sigma$  эквивалентное индуктивное сопротивление  $X_\Sigma$  импульсного ЛЭМД со стороны сети также возможно уменьшить. Однако при таком уменьшении также существует его предел, обусловленный индуктивным сопротивлением сети  $X_c$ :

$$X_{\Sigma, \text{мин}} \geq \frac{1,04}{0,05} \cdot X_c \geq 20,8 \cdot X_c. \quad (7.37)$$

Полученные соотношения (7.36) и (7.37) служат ограничением при выборе параметров импульсного ЛЭМД при его адресном проектировании в случае питания непосредственно от сети переменного тока, когда параметры сети будут определять и ограничивать параметры двигателя. С другой стороны, при нали-

чии уже изготовленного импульсного ЛЭМД необходимо сопоставить его параметры обмотки с параметрами сети, после чего принимать решение либо о допустимости непосредственного питания двигателя от сети, либо о необходимости применения промежуточного накопителя.

Обычно мощность системы электроснабжения на шинах высшего напряжения трансформаторной подстанции намного выше мощности самого трансформатора. Поэтому сопротивлениями энергосистемы ( $R_c, X_c$ ) по сравнению с сопротивлениями трансформатора в схеме замещения электроустановки можно пренебречь. Тогда относительное значение величины изменения напряжения определится по (7.34), где будут учтены параметры продольной ветви схемы замещения силового трансформатора ( $R_T, X_T$ ):

$$\delta U, \% = 100 \cdot \left( 1,82 \cdot \frac{R_T}{R_\Sigma} + 1,04 \cdot \frac{X_T}{X_\Sigma} \right), \quad (7.38)$$

а условие допустимости функционирования ЛЭМД в составе электромагнитного привода без накопителя в соответствии с (7.35) будет:

$$\frac{R_\Sigma}{R_T} \leq \frac{1,82}{0,05 - 1,04 / (X_\Sigma / X_T)}. \quad (7.39)$$

Известно, что сопротивления  $R_T$  и  $X_T$  трансформатора в схеме его замещения однозначно определяются его номинальным напряжением и мощностью. Тогда с помощью выражения (7.39) возможно учесть влияние мощности трансформатора  $S_{ном.Т}$  на указанные изменения напряжения. Например, для пяти типоразмеров трёхфазных масляных трансформаторов типа ТМ с номинальными мощностями от 250 кВ·А до 1600 кВ·А на ступени напряжения 0,4 кВ определены границы и области допустимого изменения параметров импульсных ЛЭМД (показаны штриховкой) при питании от трёхфазной системы электроснабжения через мостовой выпрямитель (Рисунок 7.23).

Для расширения области допустимого изменения параметров импульсных ЛЭМД, питаемых непосредственно от сети, необходимо, с одной стороны, уменьшить внутреннее сопротивление сети  $R_c$  и  $X_c$  ( $R_T, X_T$ ), что обычно неприемлемо, а с другой – уменьшить наброс реактивной нагрузки на этапе трогания

импульсного ЛЭМД путём применения промежуточных накопителей или быстродействующих источников реактивной мощности, способных обеспечить соизмеримую с характером изменения индуктивной нагрузки скорость наброса реактивной ёмкостной мощности. Так же для снижения потребляемой двигателем реактивной мощности на этапе трогания следует ограничить скорость нарастания тока фазы и не допускать его форсировки за счёт повышения напряжения обмотки возбуждения [108; 109; 219].

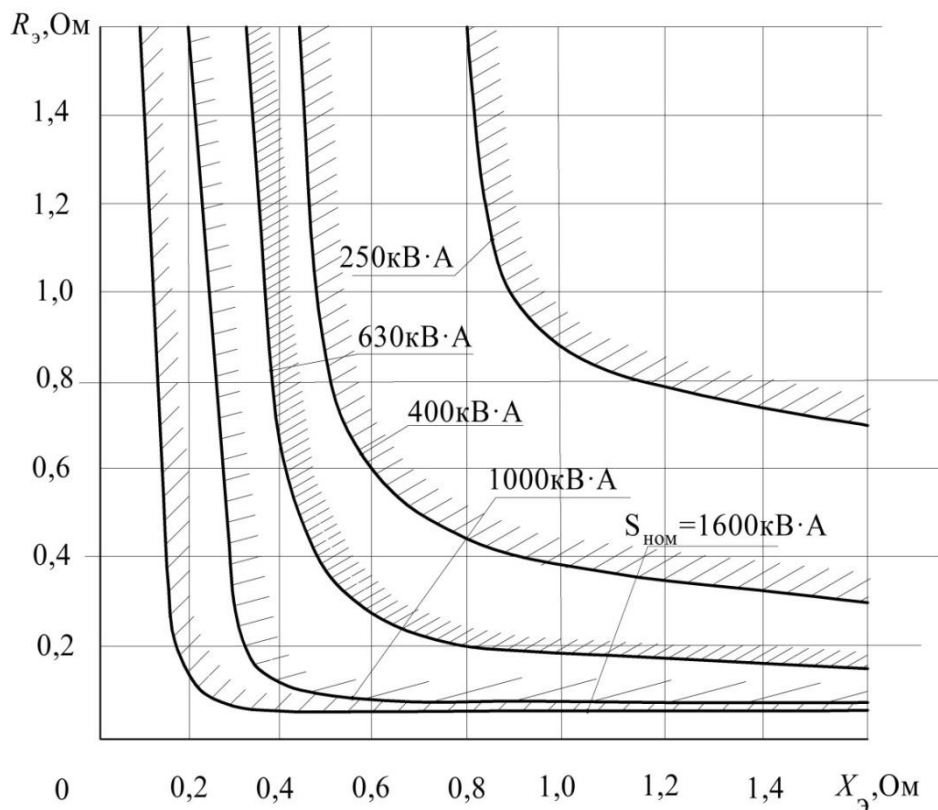


Рисунок 7.23 – Границы и области допустимого изменения параметров импульсных ЛЭМД при  $\delta U_* = 0,05$  для трансформаторов типа ТМ

Эффективным средством снижения реактивной мощности на этапе трогания якоря является его нагружение статическим противодействующим усилием с помощью устройства УЯ, входящего в конструкцию двигателя, например, в виде автономного [78] или встроенного [106; 127; 128] устройства. Импульсный ЛЭМД с устройством удержания якоря даже при пониженном напряжении сети  $U_{\text{уд}}$  ( $U_{\text{уд}} \leq U_c$ ) способен обеспечить меньшую потребляемую из сети реактивную мощность  $Q = dW_{\text{маг}}/dt \approx \Delta W_{\text{маг}}/\Delta t$  за счёт увеличения времени трогания  $\Delta t$ . За это время достигаются такие же ток трогания, начальное тяговое усилие и запас

магнитной энергии рабочих зазоров  $W_{\text{маг}}$ , как и у такого же двигателя, но при напряжении сети  $U_c$  и без устройства удержания якоря. Таким образом, с помощью устройства удержания якоря происходит естественная компенсация реактивной мощности, не требующая больших материальных затрат.

Таким образом уточнены области допустимого изменения параметров импульсных линейных электромагнитных двигателей при питании их от электрической сети промышленного предприятия. Для заданного уровня изменения напряжения границы указанных областей представлены в виде зависимостей изменения активного сопротивления двигателя от его индуктивного сопротивления, выбираемых при проектировании, причём каждому типоразмеру силового трансформатора определены минимально допустимые значения этих сопротивлений. Вне этих областей необходимо использовать либо промежуточный накопитель энергии, либо конструкцию двигателя, снабжённого устройством удержания якоря.

## **7.5 Перспективные конструктивные схемы электромагнитных машин**

При обработке материалов давлением используют устройства для ударного деформирования и получения холодносварных неразъемных контактных соединений, например, при соединении и оконцевании алюминиевых и сталеалюминиевых проводов и кабелей методом опрессовки. Основной характеристикой таких соединений является стабильность электрического сопротивления контакта. Очевидно, что при холодной сварке, например, токоведущей жилы с наконечником, контактное соединение, приобретая качества основного материала, будет обеспечивать минимальное переходное электрическое сопротивление при прочности, сравнимой с прочностью материалов, из которого изготовлены свариваемые детали [220].

Для таких операций использовались ручные прессы с гидравлическим приводом, что обеспечивало холодную сварку с весьма малыми скоростями и низкой производительностью, а наличие гидравлической системы было гро-

моздким и ограничивало применение данных устройств в условиях низких температур.

Для повышения производительности труда и получения качественного холодносварного соединения эффективно использовать исполнительный механизм с электроприводом. Предлагались конструкции с линейным электромагнитным приводом с одним двигателем, выполняющим операцию опрессования встречными пуансонами [220], между которыми совершалось предварительное обжатие заготовки, создание замкнутого объема деформируемого металла и непосредственно холодной сварки.

Значительно улучшит технологические показатели процесса ударного деформирования использование двух соосных электромагнитных двигателей с встречными пуансонами. Обычно для повышения удельной энергии удара таких двигателей используют форсированные режимы питания, что требует специальные источники питания и вызывает значительные потери в магнитопроводе двигателя от вихревых токов.

Уменьшить указанные выше недостатки позволит накопление магнитной энергии на этапе трогания с помощью нагружения двигателей за счет устройства удержания якоря в их конструкции [78; 106; 127; 128; 221-223].

Рассмотрим устройство ударного деформирования, содержащее два соосно расположенных и обращенных друг к другу ударных механизма с электромагнитными двигателями, которые крепятся к корпусу 1 (Рисунок 7.24). Каждый из ударных механизмов включает в себя опирающийся на заготовку 2 пуансон 3, обмотку 4 статора 5, внутри которой размещен комбинированный якорь 6 со штоком 7. Якорь в свою очередь содержит дисковую часть 6.1 и цилиндрическую часть 6.2.

В направляющий корпус 8 встроены броневой цилиндрический магнитопровод 9, на внутренней части которого закреплен постоянный магнит или обмотка электромагнита 10. Дисковая часть 6.1 комбинированного якоря под действием возвратной пружины 11 в исходном положении прижата к магнитопроводу 9. Цилиндрическая часть якоря 6.2 через направляющий стержень 12 взаи-

модельствует с пуансоном 3.

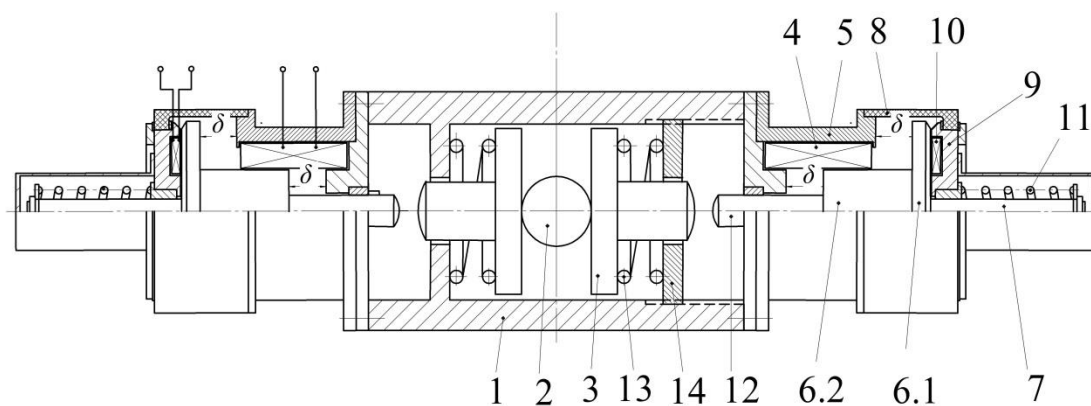


Рисунок 7.24 – Устройство для ударного деформирования

Пуансоны 3 в рабочем положении поджимаются к деформируемой заготовке 2 с помощью пружин 13. Предлагаемое устройство оснащено механическим узлом синхронизации удара, для настройки которого используется специальное регулировочное кольцо 14, установленное в корпусе 1 концентрично пуансону 3.

Дисковая часть якоря 6.1 под воздействием магнитного потока, создаваемого обмоткой электромагнита 10 и замыкающегося через нее по магнитопроводу 9, удерживается (нагружается) усилием  $F_y$ . После подключения обмотки статора 4 к источнику питания на якорь 6 воздействует возрастающее тяговое усилие  $F_T$ . Начиная с момента времени, когда тяговое усилие  $F_T$  превысит величину удерживающего  $F_y$ , двигатель начнет совершать работу в нагруженном состоянии по форсированному накоплению кинетической энергии движущейся массы якоря на всем его рабочем ходе. До нанесения удара обмотки статоров 4 отключаются от источника питания и возвратные пружины 11 обеспечивают возврат якорей 6 в исходные состояния для повторения цикла.

Устойчивость работы системы двух двигателей достигается синхронизацией удара путем автономного изменения уровня тока в каждой из обмоток электромагнитов 10 или с помощью узла синхронизации, в который входят пружины и регулировочное кольцо 14. С их помощью добиваются идентичности

параметров механизмов относительно положения деформируемой заготовки 2. Пружины 13 обеспечивают постоянный контакт между пуансонами 3 и синхронную работу системы в целом.

Устройство удержания, встроенное в каждый двигатель, в условиях ограниченного перемещения позволяет в 2...2,5 раза увеличить удельную энергию удара за счет концентрации магнитной энергии в рабочих зазорах и таким образом повысить производительность операции, например, опрессовывания накопечников.

Представляют интерес конструктивные схемы, например, электромагнито-гидравлические, ударного и вибрационного действия [224], машины, обеспечивающие активный возврат якоря вместо пружины [156; 158] и другие [225-233].

## **7.6 Перечень реализованных технологий с участием автора**

Результаты исследований были использованы рядом заинтересованных организаций при разработке и внедрении электромагнитных машин на технологических операциях проколки отверстий в корпусах изделий из оцинкованного листа (Омутнинский металлургический завод), на операции завальцовки корпусов химических источников тока (Новосибирский завод химконцентратов), на операции вырубки слюды (Балашовский слюдяной комбинат), на операциях изготовления фурнитуры кожгалантерейных изделий (Саратовская кожгалантерейная фабрика), на операциях холодной штамповки и сборки (Саратовский завод электротермического оборудования, Саратовский авиационный завод), на операциях терморезания при восстановлении железнодорожных колесных пар (Саратовское депо), на операциях клеймения изделий (машиностроительные предприятия гг. Кургана и Саратова), на операции запрессовки полумуфт центробежных насосов (Китайский насосный завод), на операциях уплотнения формовочных смесей (Семипалатинский арматурный завод), на операциях локального вытеснения металла при наплавке (сварочные производства предприятий г. Саратова), на операциях погружения стержневых заземлителей в грунт (ООО «Ин-



ко Строй-Монтаж», г. Саратов), ), на операциях сводообрушения в мукомольном производстве (Саратовская область). Материалы диссертационной работы были переданы в ООО НПП «АВИАСТЭК» в виде технологической документации на три типоразмера импульсных ЛЭМД для изготовления и реализации. Изготовленные двигатели с 2009 г. поставляются по заказам организациям для механизации различных технологических процессов (Приложение).

### **Выводы**

1. Обоснованы области допустимой работы ЛЭМД, исходя из заданного уровня колебаний напряжения, вызванного работой линейного электромагнитного привода, при питании его через вентильные преобразователи от электрических сетей промышленных предприятий и силовых трансформаторов.

2. Машины, выполненные по конструктивной схеме однообмоточного импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной, значительно проигрывают машинам, выполненным по конструктивной схеме однообмоточного импульсного ЛЭМД с пружинным накопителем по величине энергии удара и ударной мощности при одной и той же жесткости пружин, однако, на 15...25 % превосходят по частоте ходов.

3. Обоснованы рациональные способы регулирования выходных параметров импульсных ЛЭМД за счет изменения длительности и частоты питающих импульсов с помощью разработанных УПУ для ЛЭМД с полезной работой до 1000 Дж, частотой ходов до 600 мин<sup>-1</sup>., работающих в режимах одиночных и непрерывных ходов. Устройства обеспечивают возможность стабилизации энергии удара с отклонением её на 2...5% от среднего значения при изменении напряжения сети  $U_c$  в диапазоне  $\pm 10\%$  от номинального значения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные и обобщенные в диссертации, были направлены на развитие и решение крупной научно-технической проблемы создания импульсных линейных электромагнитных двигателей для технологий с высококонцентрированными потоками энергий в машиностроении, строительстве, литейном производстве, в радиоэлектронной промышленности, что позволяет повысить производительности труда, снизить потребление энергии, высвободить производственные площади.

### **Основные научные и практические результаты исследований.**

1. Установлены требования к значениям механической энергии и частоты воздействия для широкого спектра технологических процессов, реализуемых ЛЭМД: механическая энергия  $1 \dots 5 \cdot 10^4$  Дж, частота  $0,1 \dots 100$  Гц.

2. Определены оптимальные геометрические параметры и соотношения основных размеров ЛЭМД по критериям «удельная интегральная механическая работа» и «удельное тяговое усилие». Для заданной интегральной работы и превышении температуры определены оптимальные значения параметров:  $x = r_2/r_1 = 1,5 \dots 1,6$ ;  $y = l_k/r_1 = 2 \dots 4$ , где  $r_1$  – радиус втяжной части якоря;  $r_2$ ,  $l_k$  – внешний радиус и длина обмотки для ЛЭМД с двумя рабочими зазорами и комбинированным якорем; для ЛЭМД с укороченной длиной магнитной системы  $x = 1,4 \dots 1,5$ ;  $y = 1,5$ ; с поперечным магнитным полем  $x = 1,4 \dots 1,5$ ;  $y = 1,76$ .

3. Теоретически и экспериментально обоснован принцип укорочения магнитной системы импульсных ЛЭМД, позволяющий повысить их удельные силовые показатели на 30-50%.

4. Установлено, что значения основных выходных параметров ЛЭМД (энергии и усилия) определяются уровнем аккумулируемой магнитной энергии и зависят от конструктивных и режимных параметров. Это позволило теоретически и экспериментально обосновать принцип концентрации магнитной энергии для повышения их удельных энергетических показателей в 2-2,5 раза.

5. Определены факторы, влияющие на обобщенный конструктивно-

режимный параметр: количество рабочих зазоров, величина рабочего хода, ток трогания, что позволило выбрать конструктивную схему ЛЭМД, а также обосновать принцип многозазорности магнитной системы ЛЭМД.

6. Обоснованы критерии разграничения режимов по интенсивности энергетической эффективности импульсных ЛЭМД. В качестве критериев предложены коэффициенты восстановления и ослабления магнитного поля рабочих зазоров двигателя, позволяющие определить энергетические режимы с максимальной механической работой.

7. Получены основные электромеханические характеристики ЛЭМД для эффективных энергетических режимов при различных состояниях магнитных систем, что позволяет расширить область технологического применения ЛЭМД.

8. Разработаны методы проектного расчета ЛЭМД для широкого диапазона сил, энергий и частот воздействия на технологический объект.

9. Разработан на уровне изобретений способ передачи дополнительной магнитной энергии в рабочие зазоры, позволяющий увеличить механическую энергию рабочего хода на 30-35%.

10. Разработаны схемные и конструктивные решения технологического оборудования с однообмоточными ЛЭМД, обладающие повышенными динамическими, силовыми и энергетическими показателями.

11. Обоснованы области допустимой работы ЛЭМД, исходя из заданного уровня колебаний напряжения, вызванного работой линейного электромагнитного привода, при питании его через вентильные преобразователи от электрических сетей промышленных предприятий и силовых трансформаторов.

**Перспективы дальнейшей разработки темы исследования** – поиск рациональных конструкций магнитных систем для однозазорных, двухзазорных и трехзазорных импульсных ЛЭМД с одной обмоткой возбуждения с заданными тяговыми характеристиками; выполнение аналогичных исследований для двухобмоточных ЛЭМД и сравнение их с однообмоточными конструкциями по динамическим показателям.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Копылов, И.П. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: Энергия, 1973. –400 с.
- 2 Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов. –М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.
- 3 Москвитин, А.И. Электрические машины возвратно-поступательного движения. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. –144 с.
- 4 Алабужев, П.М. К выбору рациональных схем электрических машин ударного действия / П.М. Алабужев, А.Т. Зуев, А.Т. Малов и др // Исследования технологии открытых горных работ, землерезных машин и электромагнитных ударных узлов. –Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1966. – С.148-157.
- 5 Ряшенцев, Н.П. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия / Н.П. Ряшенцев, Е.М. Тимошенко, А.В. Фролов. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1967. – 260с.
- 6 Ряшенцев, Н. П. Ручные электрические машины ударного действия / Н.П. Ряшенцев, П.Н. Алабужев, Н.И. Никитин и др.– М: Наука, 1970. – 192 с.
- 7 Иванушкин, В.А. Структурное моделирование электротехнологических систем и механизмов / В.А. Иванушкин, Д.В. Исаков, В.Н. Кожеуров, Ф.Н. Сарапулов: Под общ. ред. Сарапулова Ф.Н. – Нижний Тагил: НТИ(ф) УГТУ-УПИ, 2006. – 400 с.
- 8 Прахт, В. А. Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках. Программа COMSOL / В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский, Ф. Н. Сарапулов. – М.: Спутник +, 2011. – 157 с.
- 9 Ряшенцев, Н.П. Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын.– Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.
- 10 Симонов, Б.Ф. Обоснование целесообразности применения электромагнитного привода в молотах для морского гидротехнического строитель-

- ства / Б.Ф. Симонов, А.И. Кадышев // Электромагнитные импульсные системы. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. – С.59-67.
- 11 Ивашин, В.В. Короткоходовой импульсный электромагнитный двигатель сейсмоисточника: монография / В.В. Ивашин, В.П. Певчев. – Саарбрюккен, Германия: LAP – Lambert Academic Publishing GmbH&Co.KG, 2011. – 157 с.
  - 12 Ряшенцев, Н. П. Электромагнитные молоты / Н. П. Ряшенцев, А. Т. Малов и др. – Новосибирск: Наука, 1979. – 269 с.
  - 13 Ряшенцев, Н.П. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин / Н.П. Ряшенцев, А.Н. Мирошниченко. - Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1987. –160 с.
  - 14 Ряшенцев, Н.П. Динамика электромагнитных импульсных систем / Н.П. Ряшенцев, Ю.З. Ковалев. – Новосибирск: Наука, 1974. – 188 с.
  - 15 Ряшенцев, Н.П. Электромагнитный привод линейных машин / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Ряшенцев. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
  - 16 Ряшенцев, Н.П. Об энергопреобразовании в электромагните / Н.П. Ряшенцев, Е.М. Тимошенко // Известия ТПИ. – Томск: Изд-во ТГУ. – 1965, том 129. – с.173-178.
  - 17 Сипайлов, Г.А. Электромашинный генератор импульсов сильного тока малой длительности / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос, А.И. Чучалин и др. // Электромагнитные силовые импульсные системы. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1982. – С.171-175.
  - 18 Усанов, К.М. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием: Монография / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. – 284 с.
  - 19 Усанов, К.М. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях: Монография / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, В.А. Каргин, А.В. Волгин. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. – 202 с.

- 20 Нейман, В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий // Электротехника. 2003. №9. С. 25-30.
- 21 Нейман, В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выборе конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы. Коллективная монография / под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–170
- 22 Ефимов, И.Г. Линейный электромагнитный привод / И.Г. Ефимов, А.В. Соловьев, О.А. Викторов. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1990. – 212 с.
- 23 Караваев, В.Т. Импульсный трансформатор с магнитным сопротивлением (ИМС)/В.Т. Караваев, С.Н. Запольских, А.Н. Данецкий // Электротехника. – 2003. – №8. – С. 2-5.
- 24 Каргин, В.А. Исследование и создание виброударных машин и технологий. Дисс. ... докт. техн. наук / В.А. Каргин. – Новосибирск, 1988. – 343 с.
- 25 Kudarauskas, S. Introduction to Oscillating Electrical Machines. – Klaipeda University Pb, 2004. – 183 p.
- 26 Laithwaite, E.R. Linear electric machines A personal view / E.R. Laithwaite // Proceedings of the IEEE. - 1975. - Vol. 63, № 2. - P. 250-290.
- 27 Смелягин, А.И. Синтез и исследование машин и механизмов с электромагнитным приводом. Дисс. ... докт. техн. наук /А.И. Смелягин – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1991– 248 с.
- 28 Сидоров, О.Ю. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии: Монография / О.Ю. Сидоров, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 2010.– 333 с.
- 29 Мошкин, В.И. Специфические эффекты силовых механических импульсных воздействий на технологически объекты / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Проблемы электроэнергетики. Межвуз. научн. сборник. – Саратов, 2009. – С. 71-75.

- 30 Угаров, Г.Г. Принципы повышения удельных силовых и энергетических показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей // Импульсный электромагнитный привод: Сб. науч. тр. под общ. ред. Н.П. Ряшенцева - Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991. – С 43-50.
- 31 Казаков, Ю.Н. Концентрированные потоки энергии для технологических целей: Монография / Ю.Н. Казаков, В.В. Хорев, М.Ю. Лысенко. – Саратов: СГТУ, 2000. –225 с.
- 32 Казаков, Ю.Н., Формообразование и свойства деталей при дуговых процессах с внешним воздействием / Ю.Н. Казаков, В.В. Хорев, Г.Г. Угаров, А.В. Дмитриенко, А.А. Казинский. – Саратов: СГТУ, 2007. – 328 с.
- 33 Казаков, Ю.Н. Технологические основы управления формообразованием деталей при наплавке с термосиловым воздействием. / Ю.Н. Казаков, В.Н. Лясников, В.В. Хорев // Пленки и покрытия: Сб. науч. тр. 6-й Междунар. конф. Под ред. акад В.С. Клубникина. – СПб.: СПбГТУ, 2001. – С. 486-492.
- 34 Мошкин, В.И. Линейный электромагнитный привод для энергосберегающих электротехнологий (проблемы и реализация) / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014. Материалы III Международной конференции. Сборник научных трудов. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2014. – С. 201-207.
- 35 Мошкин, В.И. Импульсные технологии в сельском хозяйстве/ Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – Новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Сборник научн. докл. XV Международной научно-практической конференции.– Тамбов: Изд-во Першина Р.В. , 2009.– С. 572-576.
- 36 Плоткин, С. М. Комплексная механизация на предприятиях радиопромышленности и приборостроения. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.

- 37 Волосатов, В. А. Элементы пневмопривода. – Л.: Машиностроение, 1975. – 134 с.
- 38 Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: Библиотека технолога / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
- 39 Опарин, В. Н. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях / В. Н.Опарин, Б. Ф. Симон, Юшкин В. Ф. и др. – Новосибирск: Наука, 2009.– 404 с.
- 40 Александров, М. П. Тормозные устройства: Справочник / М. П. Александров, А. Г. Лысяков, В. Н. Федосеев, М. В. Новожилов; Под общ. ред. М. П. Александрова. – М.: Машиностроение, 1985. – 312 с.
- 41 Луценко, В. Е. Электропривод с шаговыми двигателями / В. Е. Луценко, В.П. Рубцов. – М.: ВИНТИ, 1978. –124 с.
- 42 Вольдек, А. И. Электрические машины. – М: Энергия, 1974. – 839 с.
- 43 Подъёмно-транспортное оборудование. Каталог-справочник. Редукторы двухступенчатые. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1965. –356 с.
- 44 ГОСТ 19028-73. Насосы и агрегаты трёхплунжерные кривошипные.
- 45 Веселовский, О. Н. Линейные асинхронныедвигатели / О. Н. Веселовский, А. Ю. Коняев, Ф. Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 257 с.
- 46 Чугаев, Р. Р. Гидравлика.– Л.: Энергия, 1982.– 672 с.
- 47 Федулов, А. И. Анализ показателей гидропневмоударных устройств / А.И. Федулов, А.П. Архипенко // ФТПРПИ, 1986, №4.– С.58-69.
- 48 Дмитриенко, А.В. Определение основных параметров линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД) в приводе резца для технологии безотходного терморезания // Молодые специалисты - железнодорожному транспорту: Тез. докл. научно-практич. конференции/ Под ред. доц. А.А. Сатарова. – Саратов: Изд-во Надежда, 2002. – С. 20-25.
- 49 Ряшенцев, Н.П. Электропривод с линейными электромагнитными двига-



- телями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. –150 с.
- 50 Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели : монография / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров . – Курган: Изд-во КГУ, 2010.– 220 с.
  - 51 Львицын, А.В. Оптимальная геометрия и методика расчета приводных цилиндрических электромагнитов постоянного тока с притягивающимся якорем / А.В. Львицын, Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров и др. // Ненормальные режимы и борьба с ними в электрических системах. – Саратов: Изд-во СПИ, 1977. – Вып.1.– С. 120-126.
  - 52 Любчик, М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392с.
  - 53 Угаров, Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с повышенными силовыми и энергетическими показателями. Дисс. ... докт. техн. наук / Г.Г. Угаров – Новосибирск, 1993. – 492 с.
  - 54 Мошкин, В.И. К выбору основных базисных размеров линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Известия ВолгГТУ. – Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, №8(81) Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки». Вып. 3, 2011. – С.108-111
  - 55 Мошкин, В.И. Основные размеры и их соотношения для магнитной системы импульсного линейного электромагнитного двигателя / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2014. –№1(2). – С.71-78.
  - 56 Казаков, Л.А. Оптимальные соотношения размеров магнитопровода силовых электромагнитов постоянного тока / Л.А. Казаков, В.Ю. Кончаловский. // Электричество, 1964, № 10. – С. 23-26.
  - 57 Курносов, А.В. Наивыгоднейшие соотношения основных геометрических размеров электромагнитов постоянного тока.//Изв. ТПИ.– Томск: Изд-во ТПИ, т.160,1969.– С.56-62.

- 58 Федонин, В. Н. Определение оптимальных геометрических соотношений цилиндрических электромагнитов с двумя рабочими зазорами / В. Н. Федонин, Г. Г. Угаров, А. В. Львицын, В. Ю. Кожевников // Электрификация сельскохозяйственного производства. – Саратов: Изд-во СПИ, 1979. – Вып.124. – С. 77- 85.
- 59 Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1990. – 415с.
- 60 Кудряш, И.А. К выбору длины обмотки линейных электромагнитных двигателей с комбинированным якорем и двумя рабочими воздушными зазорами / И.А. Кудряш, М.А. Терехин, Г.Г. Угаров // Электромагнитные импульсные системы. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. – С. 89-93.
- 61 Львицын, А.В. Исследование энергетических характеристик приводных силовых электромагнитов цилиндрической структуры одного веса / А.В. Львицын, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин // Ненормальные режимы и борьба с ними в электрических системах. – Саратов,1978. – Вып.2. – С.21-24.
- 62 Мошкин, В.И. Взаимосвязь основных геометрических параметров импульсных линейных электромагнитных двигателей // Вестник Международной Академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. Том 16. № 3. – Санкт-Петербург – Курган: 2011. – С. 42-45.
- 63 Нестеров, Е.В. Определение базовых геометрических параметров вентильно-индукторного двигателя обращенной конструкции //Электричество, 2006. – № 5. – С. 63-65.
- 64 Угаров, Г.Г. Приближённый расчёт параметров длинноходового электромагнитного двигателя ударного действия / Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов //Исследование электрических силовых импульсных систем. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР,1974. – С.50-57.
- 65 Мошкин, В.И. Влияние укорочения магнитной системы на статические характеристики линейного электромагнитного двигателя с поперечным

- магнитным полем / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2015. – №1(6). – С.77-83.
- 66 Агаронянц, Р.А. Нелинейные электромагнитные элементы систем управления / Р.А. Агаронянц. – М.: Наука, 1984. – 225 с.
  - 67 Сили, С. Электромеханическое преобразование энергии: Пер. с нем.- М.: Энергия, 1968. – 376с.
  - 68 Коц, Б.Э. Электромагниты постоянного тока с форсировкой. – М.: Энергия, 1973. – С.80.
  - 69 Никитенко, А.Г. Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах / А.Г. Никитенко, И.И. Пеккер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
  - 70 Малов, А.Т. Экспериментальные статические тяговые характеристики силового электромагнита постоянного тока с плоской формой воздушного зазора / А.Т. Малов, Г.Г. Угаров // Электрические машины ударного действия. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1969. – С. 141-145.
  - 71 Сидоров, О.Ю. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии / О.Ю. Сидоров, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 331 с.
  - 72 ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 6.0. ООО «Тор» г. Санкт-Петербург. (<http://elcut.ru>).
  - 73 Мошкин, В.И. Моделирование тяговых характеристик линейного электромагнитного двигателя с различным материалом магнитопровода / В.И. Мошкин, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов // Вестник Курганского государственного университета. № 2(33) – Серия «Технические науки». Вып.9. – Курган: Изд-во КГУ, 2014. – С.85-87.
  - 74 Мошкин, В.И. Математическое моделирование импульсных линейных электромагнитных двигателей. / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шеста-

- ков, С.Ю. Помялов // Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2014. Материалы Международной научно-технической конференции. Том. 2. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2014. – С. 348-352.
- 75 Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с укороченной магнитной системой / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов // Научное обозрение. №4, 2015. – С. 22-28.
- 76 Дмитриенко, А. В. Расчёт статических тяговых характеристик цилиндрического ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем / А. В. Дмитриенко, В. И. Мошкин, Г. Г. Угаров // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». Вып. 1. №2(02) – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. – С. 236-238.
- 77 Мошкин, В.И. Повышение удельных силовых показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Импульсные линейные электромагнитные двигатели. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 50-56.
- 78 Патент RU №2018652, E21C 3/16. Электрический молот. / Э.Ф. Маер, В.И. Мошкин, И.П. Попов (РФ). 4712733/03; заявл. 03.07.89; опубл. 30.08.1994.
- 79 Патент RU2084071, МПК H02K33/02. Линейный электромагнитный двигатель / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман, опубл. 10.07.1997, Б.И.№19.
- 80 Мошкин, В.И. Оценка параметров устройства форсированного накопления магнитной энергии линейного электромагнитного двигателя / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Инновационные технологии в обучении и производстве. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, г. Камышин, 15-16 декабря 2009 г. Том 2. – Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2010. – С. 75-78.
- 81 Мошкин, В.И. К расчёту усилия удержания интегрированного линейного электромагнитного двигателя // Электротехника, 2013, № 8. – С.60-63.
- 82 Ивашин, В.В. Энергетические соотношения электромагнита постоянного

- тока при отрыве якоря внешними силами. Силовые полупроводниковые и импульсные электромеханические преобразовательные устройства. / В.В. Ивашин, С.Б. Плотников. – Куйбышев: КПИ, 1976. – С.12-16.
- 83 Мошкин, В.И. Анализ процесса намагничивания линейного электромагнитного двигателя с интегрированным устройством форсированного аккумулирования магнитной энергии / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы VI Всероссийской научно-практической конф., том 2, Волгоград, 2010. – С.71-75.
  - 84 Мошкин, В.И. Аккумулирование магнитной энергии в интегрированных линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики. Межвуз. научн. сборник. - Саратов, 2010. С. 62-68.
  - 85 Мошкин, В.И. Оценка влияния конструктивных параметров ферромагнитного шунта на величину усилия удержания якоря ЛЭМД //Вестник Курганского государственного университета.– Серия «Технические науки».– Вып. 5. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – С. 63-68.
  - 86 Guseinovienė, E. Simanynienė, L. Senulis, A. Kudarauskas, S. Specialiųjų elektros mašinų magnetiniai laukai ir magnetinės grandinės // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 4(46). – P. 74-77.
  - 87 Хусаинов, И.М. Форсированное накопление магнитной энергии в импульсном электромеханическом преобразователе / И.М. Хусаинов, А.Х. Массад // Проблемы электроэнергетики. Межвуз. научн. сб. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2003. – С.36-38.
  - 88 Мошкин, В.И. Исследование режимов форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, А.А. Егоров, Г.Г. Угаров // Вестник Саратовского государственного технического университета.– Саратов: Изд-во СГТУ, 2006, №1(10), вып.1. – С. 39-44.
  - 89 Ugarov, G.G. The Effect of Design Parameters of an Integrated Linear Elec-

- tromagnetic Motor, At the Process of Pulling Away Anchor, From Its Breakaway Stage./ G.G. Ugarov, V.I. Moshkin, A.K. Massad / International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER). – 2014. Sept. – Vol. 4.| Iss.9. –Pages 42-49.
- 90 Ugarov, G.G. The Influence of Holding Device Anchor Parameters on the Holding Force Magnitude of an Integrated Linear Electromagnetic Motor ./ G.G. Ugarov, V.I. Moshkin, A.K. Massad / The International Journal of Engineering And Science (IJES). – 2014. – V. 3. Iss. 4. – P. 01-06.
  - 91 Мошкин, В.И. Условия отрыва якоря интегрированного линейного электромагнитного двигателя/ В.И. Мошкин. // Электротехника, 2017, № 1. – С.16-21.
  - 92 Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон // Пер. с англ. Н.Ф. Ильинского и др. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 528 с.
  - 93 Нейман, В.Ю. Основы построения и развития теории импульсных линейных электромагнитных двигателей с повышенными энергетическими показателями: Дисс. ... докт. техн. наук /В.Ю. Нейман. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 365 с.
  - 94 Вырыханов, Д.А. Силовая электромагнитная импульсная система для наземной сейсморазведки малых глубин: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Саратов, 2006. –152 с.
  - 95 Мошкин, В.И. Способы и устройства повышения концентрации магнитной энергии в линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Электроприводы переменного тока. Труды Международной пятнадцатой научно-технической конференции. 12-16 марта 2012 г. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2012. – С. 19-22.
  - 96 Певчев, В. П. Анализ влияния форсировки короткоходового импульсного электромагнитного двигателя сейсмоисточника на КПД / В. П. Певчев. ФТПРПИ №6, 2010 С. 77-87.
  - 97 Серебряков, В.Н. Аппроксимация основной кривой намагничивания маг-

- нитных материалов / В.Н. Серебряков, А.Ф. Катаев // Проблемы электроэнергетики: Межвуз. науч. сб. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2004. – С. 244-247.
- 98 Мошкин, В.И. Энергетические характеристики элементарных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного типа при насыщенной магнитной цепи // Вестник Курганского государственного университета. – Серия «Технические науки». – Вып. 7. – Курган: Изд-во КГУ, №2(24), 2012. – С. 72-77.
  - 99 Мошкин, В.И. Влияние режимных и конструктивных параметров линейных электромагнитных двигателей на эффективность электромеханического преобразования энергии / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник Саратовского государственного технического университета, №2(66), вып.2. – Саратов, 2012. – С. 124-129.
  - 100 Певчев, В.П. О возможности повышения механической энергии короткоходового импульсного электромагнитного двигателя сейсмоисточника // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – № 3. – С. 43–46.
  - 101 А.с. 821018 СССР, МКИ В 21 J 7/30. Электромагнитный пресс / А.В. Львицын, Г.Г. Угаров, Г.А. Витмаер и В.Н. Федонин (СССР) – Опубл. 15.04.81. Бюл. №14. с. 206.
  - 102 Мошкин, В.И. Концентрация магнитной энергии в рабочих зазорах импульсного линейного электромагнитного двигателя на этапе ее электромагнитного преобразования / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2015. –№4(9). – С.20-26.
  - 103 А.с. № 1488951 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62 Устройство для управления электромагнитным двигателем /Э.Ф. Маер, В.И. Мошкин, А.В. Львицын , Г.Г. Угаров и К.М. Усанов. 23.06.89. БИ №23. С 263.
  - 104 А.с. № 1292046 СССР, МКИ Н 01 F 7/18. Устройство для управления электромагнитом. /А.В. Львицын, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров и К.М. Усанов. 23.02.87. БИ №7, С. 231.

- 105 А.с. № 1309249 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62. Устройство для управления электромагнитным двигателем. /А.В. Львицын, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров и К.М. Усанов. 07.05.87. БИ №17, С. 235.
- 106 Патент на полезную модель RU № 59342 U1, МПК H02K 33/02 (2006.01) Линейный электромагнитный двигатель с удержанием якоря / В.И. Мошкин, К.М. Усанов, А.В. Волгин и В.А. Каргин. Приоритет от 31.07.2006; опубл. 10.12.2006 Бюл. №34.
- 107 Мошкин, В.И. Предельная магнитная энергия электромеханического преобразователя электромагнитного типа / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2016. Материалы Международной научно-технической конференции. Том. 2. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2016. – С. 424-428.
- 108 Мошкин, В.И. Оценка эффективности способов концентрации магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2014. Материалы Международной научно-технической конференции. Том. 2. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2014. – С. 344-348.
- 109 Мошкин, В.И. Режимы аккумуляирования магнитной энергии в линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2016. – №2(11). – С. 25-30.
- 110 Нейман, В.Ю. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей / В.Ю. Нейман, А.А. Петрова. // Электротехника, №9, 2007. С.47-50.
- 111 Мошкин, В.И. Критерии эффективности преобразования магнитной энергии в линейном электромагнитном двигателе / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Вестник Саратовского государственного технического университета, №3(47), вып.2.- Саратов, 2010. – С. 71-76.
- 112 Семичев, Е. Я, Использование электромагнитной энергии в электромагнитных механизмах. – Л.: Изд-во ЛЭМИ, 1929. – 56 с.



- 113 Угаров, Г.Г. Режимы форсированного накопления магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях / Г.Г. Угаров, К.М. Усанов, В.И. Мошкин // Электроприводы переменного тока: доклады 10-й научно-технической конференции ЭПТ-95, 14-17 марта 1995 г. – Екатеринбург, 1995,– С 154-155.
- 114 Мошкин, В.И. Специальные режимы линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, А.П. Моисеев, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы энергетики АПК. Материалы Международной научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во СГАУ, 2010. – С. 234-238.
- 115 Мошкин, В.И. Электромеханические характеристики импульсных линейных электромагнитных двигателей продольного магнитного поля в функции перемещения / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2016. Материалы Международной научно-технической конференции. Том. 2. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2016. – С. 408-415.
- 116 Мошкин, В.И. Рабочие процессы линейных электромагнитных двигателей при рекуперации в питающую сеть магнитной энергии рабочих зазоров. // Стратегия качества в промышленности и образовании 8-15 июня 2012 г. Материалы VIII Международной конференции. Том 2. Варна, Болгария. – С. 134-138.
- 117 Певчев, В.П. Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей: Монография / В.П. Певчев, В.В. Ивагин. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
- 118 Мошкин, В.И. Анализ элементарных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного типа / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. – М.:1986. – 16 с. Деп. в Информэлектро, №416 эт.
- 119 А.с. 1136294 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62. Электропривод возвратно-поступательного движения / В.С. Крапивин, В.И. Арсентьев и А.А. Сорокин (СССР) – Оpubл. 23.01.85. Бюл. №3.

- 120 Гордон, А.В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 446 с.
- 121 Патент RU № 2127017 Н 02 К 33/02. Способ управления однообмоточным линейным электромагнитным двигателем ударного действия / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман, К.М. Усанов. – 27.02.99, БИ № 6.
- 122 Запольских, С.Н. Импульсные электромеханические системы с магнитными накопителями энергии / С.Н. Запольских // Автореферат дисс... канд. техн. наук. – Екатеринбург: 2007. – 20 с.
- 123 Бондалетов, В.Н. Определение электромагнитных сил, их работы и электромеханического КПД в контурах с токами // Электричество. – 1966. – №1. – С. 57-61.
- 124 Мошкин, В.И. Энергетические режимы импульсных линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS'2016) (Пермь, 3-7 октября 2016 г.). – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. – С. 71-76.
- 125 Мошкин, В.И. Влияние степени восстановления магнитной энергии импульсного линейного электромагнитного двигателя на его механическую работу/В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. // Труды 6-й Международной научно-практической конференции ЭКСИЭ - 06 «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии», г. Екатеринбург, Россия, 19 апреля 2017 г. – Екатеринбург, УМЦ УПИ, 2017. – С 144-147.
- 126 Moshkin, V.I. Pulsing linear electromagnetic motor mechanical work within the desaturated magnetic system / V.I. Moshkin // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Conference Publications, 2017. – Pages 1-4.
- 127 Патент RU № 2604356 С1. Импульсный электромагнитный привод, МПК Н 02 К 33/02, Н 01 F 7/18 /В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов. Оpubл. 10.12.2016. Бюл. №34 – 12 с.

- 128 Патент RU № 2601727 С1. Электромагнитный пресс, МПК В30В 1/42, В 21J 7/30, Н02 К 33/02 /В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов. Оpubл. 10.11.2016. Бюл. №31. – 12 с.
- 129 Усанов, К.М. Совершенствование технических средств и технологий АПК системами с электромагнитными импульсными машинами /К.М. Усанов. //Дисс.... докт. техн. наук – Саратов, 2009. – 433 с.
- 130 Мошкин, В.И. О вводе сторонней механической энергии в импульсный линейный электромеханический преобразователь / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2015, №3(8). – С.77-83.
- 131 Массад, А.Х. Универсальный электромагнитный привод для переносных ударных механизмов. / А.Х. Массад. Дисс. ... канд. техн. наук. –Саратов, 2001. – 140 с.
- 132 Мошкин, В.И. Анализ форм импульсов движущих сил / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. – М.: 1985. – 15 с. Деп. в Информэлектро, №66эт.
- 133 Егоров, А.А. Импульсный линейный электромагнитный привод устройств маркирования и клеймения мелкогазмерных гадетел и изаделий: Монография / А.А. Егоров, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. –136 с.
- 134 Мошкин, В.И. О рациональной форме движущих сил, гадаанных как функции перемещения / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров //Курган. машиностр. ин-т. – Курган,1984. – 15 с. – Деп. в Информэлектро, N 318эт - 84Деп.
- 135 Мошкин, В.И., Энергетическая и динамическая эффективность гаоднообмоточных линейных электромагнитных гаагателей с пружинным накопителем // Известия ТПУ, 2015, №5, Т.326 – 2015. – С.54-61.
- 136 Мошкин, В.И. Исследование комбинированных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного гаапа/ В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Импульсный электромагнитный гаавод: Сб. науч. тр. Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР,

1988. – С 38-44.
- 137 Тронов, А.П. Исследование энергетики процесса трогания линейных электромагнитных двигателей / А.П. Тронов, Г.Г. Угаров, Г.П. Образцов // Материалы научно-технической конференции по электроприводу и электрообеспечению промышленных предприятий. – Красноярск: Изд-во КПИ, 1969. – С.155-167.
  - 138 Мошкин, В.И. Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке. Известия Томского политехнического университета. Энергетика. Том 321, № 4, 2012. – С 93-96.
  - 139 Гринченков, В.П. Метод расчета динамических характеристик электромагнитов с массивным магнитопроводом /В.П. Гринченков, Ю.К. Ершов // Изв.вузов. Электромеханика,1989, N 8.– С. 61-68.
  - 140 Ольсон, Г. Динамические аналогии.– М: Изд-во иностр. лит., 1947. – 291 с.
  - 141 Милях, А.Н. Принцип взаимности и обратимость явлений в электротехнике /А.Н. Милях, А.К. Шидловский. – Киев: Наукова думка,1967. – 316 с.
  - 142 Буль, Б.К. Основы теории электрических аппаратов /Б.К. Буль, Г.В. Буткевич, А.Г. Годжелло, В.Г. Кураев, Н.Е. Лысов, П.В. Сахаров, А.Г. Сливинская, И.С. Таев, А.А. Чунихин. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.
  - 143 Мошкин, В.И. Расчет основных параметров и анализ конструктивных схем электромагнитных ударных машин с помощью теоремы взаимности / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров //Ударные процессы в технике. Тезисы Республиканского научно-технического семинара. – г. Фрунзе, 1988. – С.86-87.
  - 144 Угаров, Г.Г. Вопросы исследования и создания мощных электромагнитных машин ударного действия: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Ин-т горного дела СО АН СССР. – Новосибирск, 1972. – 18 с.
  - 145 Ряшенцев, Н.П. Методика предварительного расчета длинноходового броневого электромагнита ударного действия / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Федонин, Г.Г. Угаров и др. // Электрические линейные двигатели. – Новоси-

- бирск: ИГД СО АН СССР, 1972. – С. 3-13.
- 146 Мошкин, В.И. Использование принципа взаимности при исследовании и расчёте энергетических характеристик линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Задачи динамики электрических машин. – Омск: Изд. ОмПИ, 1988. – С. 120-128.
  - 147 Мошкин, В.И. Основные энергетические и динамические параметры однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной. // Вестник Курганского государственного университета. – Серия «Технические науки». – Вып. 6. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2011. – С. 105-109.
  - 148 Мошкин, В.И. Взаимные соотношения в мощных импульсных электромагнитных машинах / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Вестник Саратовского государственного технического университета, №3(47), вып.2.– Саратов, 2010. – С.65-71.
  - 149 Мошкин, В.И. Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник СГТУ. – 2012. – № 2 (66). – Вып. 2. – С. 129–135.
  - 150 Симонов, Б.Ф. О границах области существования электромагнитных молотов. Сборник научных трудов /Б.Ф. Симонов, В.П. Гривастов. – Новосибирск. Сиб.отд-ние АН СССР, 1978. –С.52-59..
  - 151 Угаров, Г.Г. Тенденция развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 2. – С. 37–43.
  - 152 Neyman, V.Yu. Comparison of geometrically similar electromagnet systems by means of the constancy condition of heat criterion/ V.Yu. Neyman, L.A. Neyman, A.A. Petrova, // Russian Electrical Engineering. – 2011. – V. 82. – Iss. 12. – P. 651-652.
  - 153 Neyman, V.Yu. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor /

- V.Yu. Neyman, L.A. Neyman, A.A. Petrova, A.A. Skotnikov, O.V. Rogova // Russian Electrical Engineering. – 2011. – V. 82. – Iss. 6. – P. 328-331.
- 154 Malinin L.I., Neyman V.Yu. Limiting power characteristics of direct-current electromagnetic motors // Russian Electrical Engineering. – 2009. – V. 80. – Iss. 12. –P. 701-706.
  - 155 Усанов, К.М. Динамическая эффективность однообмоточных электромагнитных ударных машин с различными рабочими циклами. / К.М. Усанов, В.А. Каргин, И.В. Трубенкова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010, №12 (74).– С.67-70.
  - 156 Патент RU №2026792, МПК В30В1/42 /Э.Ф. Маер, А.Г. Баталов, В.И. Мошкин и др. Электромагнитный пресс. Оpubл. 20.01.1995.
  - 157 Патент RU № 2025277 С1 В 30 В 1/42, В21J 7/30. Электромагнитный пресс / Э.Ф. Маер, В.И. Мошкин, В.Ф. Мошкина и И.П. Попов. 30.12.94. БИ № 24.
  - 158 А.с. № 1810963А1 Н02К 33/02. Электромагнитный двигатель /Э.Ф. Маер, А.Г. Баталов, В.И. Мошкин, и И.П. Попов. 23.04.93. БИ №15.
  - 159 Патент RU № 2398247 С1, МПК G01V 1/04. Импульсный привод электромагнитного сейсмоисточника / В.В. Ивагин, В.П. Певчев, опубл. 27.08.2010, Бюл. №24.
  - 160 Мошкин, В.И. Определение основных геометрических параметров импульсного линейного электромагнитного двигателя по значению максимального тягового усилия / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Научное обозрение. №3, 2015. – С. 18-23.
  - 161 Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого и др.– Т.3. –3-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 728 с.
  - 162 Селезнев, В.А. Принципы повышения эффективности импульсных электромагнитных сейсмоисточников малой мощности для исследования малых глубин / В.А. Селезнев, В.А. Живодров, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов //

- Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов: 2003, №01(03). – С. 28-29.
- 163 Тер-Акопов, А.К. Динамика быстродействующих электромагнитов /А.К. Тер-Акопов.– М.: Энергия, 1965.– 150 с.
  - 164 Львицын, А.В. Режимы работы линейных электромагнитных двигателей / А.В. Львицын, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Оптимизация параметров и характеристик. – Саратов: Изд-во Сар. ун-та, 1986. – Вып.5. – С.73-80.
  - 165 А.с. № 1435708 СССР, МКИ Е 21 С 3/16. Электромагнитный молот / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, М.А. Теребенин (СССР) – Оpubл. 07.11.88. Бюл.№41. с. 100.
  - 166 А.с. № 1663458 СССР, МКИ G 01 L 5/00 Устройство для измерения энергии удара /А.А. Перьев, Н.А. Бритков, Г.Г. Угаров и В.И. Мошкин. 15.07.91. БИ №26. С. 51.
  - 167 Любчик, М.А. Теоретическое и экспериментальное определение потоко-  
цепления силовых электромагнитов / М.А. Любчик, Б.В. Клименко // Электротехника, 1971, № 9. – С. 57-58.
  - 168 Свечарник, Д.В. О максимуме КПД электрических двигателей постоянно-  
го тока / Д.В. Свечарник , А.И. Гандзий // Изв. вузов. Электромеханика. – 1989, № 4.– С. 103-105.
  - 169 Мошкин, В.И. О возможности увеличения энергии рабочего хода им-  
пульсного линейного электромагнитного двигателя / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2016. –№2(11). – С. 19-24.
  - 170 Мошкин, В.И. Универсальное устройство питания и управления линей-  
ными электромагнитными двигателями в приводе прессового оборудова-  
ния / В.И. Мошкин // Электромагнитные импульсные системы. – Новоси-  
бирск: ИГД СО АН СССР, 1989. – С.133-141.
  - 171 А.с. № 1453525 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62 Устройство для управления од-

- нообмоточным электромагнитным двигателем ударного действия /Э.Ф. Маер, Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров и В.И. Мошкин. 23.01.89. БИ №3.
- 172 Мошкин, В.И. Рабочие процессы линейных электромагнитных двигателей при рекуперации магнитной энергии рабочих зазоров / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, С.Ю. Помялов // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы I Международной научно-технической конференции. Часть 5. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2011. – С. 87-92.
- 173 Львицын, А.В. Рабочие процессы линейных электромагнитных двигателей с высоким использованием электромагнитной энергии / А.В. Львицын, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Характеристики машин в системах электропривода. – Саратов: Изд-во Сар. ун-та, 1987. –Вып.6. – С.10-15.
- 174 Ступель, Ф.А. Электромеханические реле. Основы теории, проектирования и расчета: Учеб. пособие / Ф.А. Ступель. – Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1956. –355 с.
- 175 Кравченко, А. Н. Вибрационный насос с электромагнитным возбуждением / А. Н.: Кравченко. Дисс.... канд. техн. наук : – Томск, 1988.– 180 с.
- 176 Носовец, А.В. Исследование рабочего процесса и схемы управления сваебойного электромагнитного молота / А.В. Носовец . Дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1975. – 142 с.
- 177 Усанов, К.М. Переносной электромагнитный привод для погружения металлических стержней в грунт / К.М. Усанов. Автореферат дисс... канд. техн. наук. – Омск: Изд-во ОмПИ, 1993. –16 с.
- 178 Ряшенцев, Н.П. Экспериментальное исследование рабочего процесса и энергетики соленоидного молотка со свободным выбегом бойка / Н.П. Ряшенцев, Е.М. Тимошенко // Известия ТПИ, том 123, 1963. –С.82-92.
- 179 Шевченко, С.М. Движение и удары в электрических аппаратах автоматического управления / С.М. Шевченко. – М.: Энергия, 1979.–144 с.
- 180 ГОСТ 15989-83. Молотки ручные электромагнитные. – М.: Изд-во стан-



- дартов, 1984. – 20 с.
- 181 Мошкин, В.И. Определение продолжительности включения линейного электромагнитного двигателя в приводе технологического оборудования / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Проблемы электроэнергетики: Межвуз. научн. сборник. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. – С. 92-94.
  - 182 Мошкин, В.И. Продолжительность включения линейного электромагнитного двигателя в приводе технологического оборудования / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, С.Ю. Помялов // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы LI Международной научно-технической конференции. Часть 5. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2013. – С. 57-60.
  - 183 Ряшенцев, Н.П. Прессовое оборудование с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын, В.Н. Федонин // Электромагнитные силовые импульсные системы. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. – С. 3-13.
  - 184 Бабичев, А.П. Вибрационная обработка деталей / А.П. Бабичев. – М.: Машинотроение, 1974. –134 с.
  - 185 Богоявленский, К.Н. Экономичные методы формообразования деталей / К.Н. Богоявленский, В.В. Рис. – Л.: Лениздат, 1984. –144 с.
  - 186 Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные приводы в энергосберегающих электротехнологиях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2014. –№1(2). – С.86-90.
  - 187 Казаков, Ю.Н. Технологическое обеспечение трибологических свойств деталей при наплавке: Монография / Ю.Н. Казаков, В.В. Хорев. – Саратов: СГТУ, 2000. – 154 с.
  - 188 Аипов, Р. С. Линейные электрические машины и линейные асинхронные электроприводы технологических машин / Р. С. Аипов, А. В. Линенко ; Башк. гос. аграр. унт. Уфа : Башк. ГАУ, 2013. 306 с.
  - 189 Мошкин, В.И. К сравнению конструктивных схем импульсных линейных

- электромагнитных двигателей/ В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2014. –№4(5). – С. 34-40.
- 190 А.с. 734911 СССР, МКИ В 21 J 7/30. Электромагнитный пресс/ А.В. Львицын, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин и Г.А. Витмаер – Оpubл.23.05.81. Бюл.№ 19.
  - 191 А.с. 821018 СССР, МКИ В 21 J 7/30. Электромагнитный пресс / А.В. Львицын, Г.Г. Угаров, Г.А. Витмаер В.Н., Федонин – Оpubл.15.04.81. Бюл. № 14.
  - 192 А.с. 880597 СССР, МКИ В 21 J 7/30. Электромагнитный пресс с тиристорным управлением / Г.А. Витмаер, А.В. Львицын, Г.Г. Угаров и В.Н. Федонин – Оpubл.15.11.81. Бюл. № 42.
  - 193 А.с. 989595 СССР, МКИ Н 01 F 7/18. Устройство для управления электромагнитом / Г.А. Витмаер, В.Ю. Кожевников, А.В. Львицын, Г.Г. Угаров и В.Н. Федонин – Оpubл. 15.01.83. Бюл. № 2.
  - 194 Мошкин, В.И. Биполярный источник питания линейных электромагнитных двигателей на электрохимических конденсаторах / В.И. Мошкин, И.М. Хусаинов, Г.Г. Угаров // Инновационные технологии в обучении и производстве. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции г. Камышин 22–23 декабря 2010 г. Том 1. – С 126-130.
  - 195 Мошкин, В.И. Устройство питания и управления нового поколения для линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, И.М. Хусаинов, Г.Г. Угаров // Инновационные технологии в обучении и производстве. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции г. Камышин 22–23 декабря 2010 г. Том 1. – С.130-133.
  - 196 Патент на полезную модель RU № 46893 U1 H02P 7/62 Устройство для управления однообмоточным электромагнитным двигателем ударного действия /А.В. Волгин, К.М. Усанов, В.И. Мошкин. 27.07.05 БИ № 21.
  - 197 А.с. № 1495974 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62 Устройство для управления двухобмоточным электромагнитным двигателем /Ю.П. Агафонов, Э.Ф.

- Маер, В.И. Мошкин и Г.Г. Угаров. 23.07.89. БИ №27. С. 266.
- 198 А.с. № 1636981 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62 Электровибропривод /Ю.П. Агафонов, Э.Ф. Маер, В.И. Мошкин и Г.Г. Угаров. 23.03.91. БИ №11. С. 176.
  - 199 Усанов, К.М. Тиристорный преобразователь для управления линейным импульсным электрическим двигателем с электромагнитным узлом статического нагружения якоря / К.М. Усанов, А.В. Волгин, В.И. Мошкин // Аграрный научный журнал. – Саратов: Изд-во СГАУ, 2005, № 4. – С. 51-54.
  - 200 Мошкин, В.И. Особенности построения устройств питания и управления импульсным электромагнитным двигателем от промышленной сети / В.И. Мошкин, С.Ю. Помялов, А.А. Трофимов // Вестник Курганского государственного университета. № 1(20) – Серия «Технические науки». Вып. 6. – Курган: Изд-во КГУ, 2011. – С. 109-113.
  - 201 Мошкин, В.И. Влияние импульсных электромагнитных двигателей на колебания напряжения в электрической сети промышленного предприятия / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Электротехника, №2, 2015. – С 16-21.
  - 202 Moshkin, V.I. The effect of pulse linear electromagnetic motors on voltage fluctuations in electric power networks of an industrial enterprise / V.I. Moshkin, G.G.Ugarov // Russian Electrical Engineering Volume 86, Issue 2, 1 February 2015, Pages 61-65.
  - 203 Мошкин, В.И. Влияние импульсных электромагнитных двигателей на колебания напряжения в электрической сети промышленного предприятия / В.И. Мошкин, С.Ю. Помялов, Г.Г. Угаров // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы *LIII* Международной научно-технической конференции. Часть III. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2014. – С. 269-275.
  - 204 Егоров, А.А. Влияние предыстории импульсного намагничивания магнитной системы линейного электромагнитного двигателя на энергетические

- показатели привода / А.А. Егоров, Г.Г. Угаров, Д.А. Вырыханов // Вестник Саратовского государственного технического университета. Вып. № 1, том 1.– Саратов: Изд-во СГТУ, 2006. – С. 44-49.
- 205 Егоров, А.А. Анализ процесса установления стабилизации разрядных импульсов в силовых электромагнитных импульсных системах / А.А. Егоров, Д.А. Вырыханов, В.И. Мошкин // Интеллектуальный потенциал высшей школы – железнодорожному транспорту: Сб. науч. статей: В 2 т. – Саратов: Научная книга. 2006.– Т. 1. – С. 39-42.
- 206 Перьев, А.А. Совершенствование методов и средств измерения энергетических параметров электромагнитных машин ударного действия / А.А. Перьев // Электромагнитные импульсные системы. Сб-к науч. трудов: Отв. ред. д.т.н. Н.П. Ряшенцев. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. – С. 13-26.
- 207 Электрохимические конденсаторы и конденсаторные модули ОАО «Энергия». Каталог. [www. http://oao-energiya.ru/kondensatory.html](http://oao-energiya.ru/kondensatory.html).
- 208 Симонов, Б. Ф. Мехатронная система “синхронный генератор – трехфазный мостовой выпрямитель” для автономных энергетических систем/ Б. Ф. Симонов, С. А. Харитонов, В. В. Машинский // ФТПРПИ, № 3. 2012. – С. 102-112.
- 209 Бут, Д. А. Накопители энергии /Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
- 210 Мошкин, В.И. Накопители энергии в силовых электромагнитных импульсных системах / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.А. Вырыханов // Инновационные технологии в обучении и производстве. Сб. науч. докл. VI Всероссийской научно-практической конференции. Том 2. – Камышин: Изд-во ВолгГТУ, 2009. – С. 79-82.
- 211 Нейман, Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян: В 2-х т. Том 1 – 3-е изд. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536с.
- 212 Пентегов, И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей

- энергии / И.В. Пентегов. – К.: Наукова думка. – 1982. – 424с.
- 213 Подгорный, В.В. Импульсные электромагнитные системы / В.В. Подгорный // Практикум. Вып.5: Заряд конденсатора с токоограничивающей индуктивностью: Методические рекомендации к лабораторной работе №4 – Волгоград: Изд-во ВолГТУ, 2001. – 24с.
- 214 Мошкин, В.И. Энергетические характеристики процесса заряда ёмкостного накопителя энергии / В.И. Мошкин // Вестник Курганского государственного университета. – Серия «Технические науки». – Вып. 7. – Курган: Изд-во КГУ, №2(24), 2012. – С. 82-85.
- 215 Симонов, Б. Ф. Система стабилизации напряжения для энергетических объектов горнодобывающих предприятий/ Б. Ф. Симонов, С. А. Харитонов, С. В. Брованов, Е. Я. Букина, Д. В. Макаров // ФТПРПИ, № 2. 2016. – С. 88-101.
- 216 Симонов, Б. Ф. Стабилизация напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами изменением частоты вращения в автономных системах электроснабжения / Б.Ф. Симонов, С.А. Харитонов, А.В. Сапсалева // ФТПРПИ, № 5. 2015. – С. 124-131.
- 217 Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – М.: Энергия, 1977. – 128 с.
- 218 ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.– М. : Стандартинформ. – 20 с.
- 219 Клименко, Б. В. Форсированные электромагнитные системы / Б. В. Клименко – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
- 220 А.с. №1118504 СССР, МКИ В 23 К 20/00. Устройство для соединения контактов / В.А. Каргин, П.Э. Львутин 3491036/25-27; заявл. 08.07.82; опубл. 15.10.1984. Бюл. № 38.
- 221 Мошкин, В.И. Перспективы развития силовых электромагнитных импуль-

- сных систем / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник Курганского государственного университета. № 2(29) – Серия «Технические науки». Вып.8. – Курган: Изд-во КГУ, 2013. – С.88-90.
- 222 Моисеев, А.П. Обоснование выбора двигателей привода тросошайбовых (штанго-дисковых) транспортеров / А.П. Моисеев, В.И. Мошкин, К.М. Усанов // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – Новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства. Сборник научн. докл. XV Международной научно-практической конференции. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2009. – С. 555-558.
- 223 Мошкин, В.И. Регулируемые линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий и привода / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Тезисы докл. VII научно-технической конференции «Повышение надежности, экономичности и конкурентоспособности асинхронных электродвигателей и электроприводов». – Кемерово, Изд-во НПО Кузбасэлектромотор, 1992. – С. 8-9.
- 224 Угаров, Г.Г. Электромагнитогидравлические машины ударного и вибрационного действия / Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2016. – № 1 (10). С. 63-66.
- 225 Патент на полезную модель RU № 59343 U1, МПК H02K41/03 (2006.01) Линейный шаговый электромагнитный двигатель / В.И. Мошкин, К.М. Усанов, А.В. Волгин и А.В.Львицын. Оpubл. 10.12.2006 Бюл. №34.
- 226 Патент RU №2567872 C2 H02K 41/035. Электрическая машина возвратно поступательного движения / В.И. Мошкин, И.П. Попов, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева . 10.11.2015. Бюл. № 31.
- 227 Патент RU № 2478252 C2 H02K 33/16, H02K 41/02, H02K 1/06. Линейная электрическая машина / В.И. Мошкин, И.П. Попов, Ф.Н. Сарапулов и С.Ф. Сарапулов. 27.03.2013. Бюл. № 9.
- 228 Патент RU № 2479705 C2 E21B 1/22, E02D 7/02. Электромагнитный мо-

- лот / В.И. Мошкин, И.П. Попов, Ф.Н. Сарапулов и С.Ф. Сарапулов. 20.04.2013. Бюл. № 11.
- 229 Патент RU №2479431 C2 B30B 1/42, B21J 7/30. Электрический пресс / В.И. Мошкин, И.П. Попов, Ф.Н. Сарапулов и С.Ф. Сарапулов. 20.04.2013. Бюл. № 11.
- 230 Патент на полезную модель RU №132034 U1 B30B 1/42, B21J 7/30 Электромеханический пресс непосредственного действия /И.П. Попов, В.И. Мошкин, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева. 10.09.2013. Бюл. № 25.
- 231 Патент RU №2498351 C1, МПК G01V 1/04. Импульсный электромагнитный привод сейсмоисточника / В.В. Ивагин, М.В. Кочетков, В.П. Певчев, опубл. 10.11.2013. Бюл. № 31.
- 232 Патент RU №2528942 C2 B30 B 1/42 Электромеханический пресс// И.П. Попов, В.И. Мошкин, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева. 20.09.2014. Бюл. № 26.
- 233 Патент RU №2534554 C2 E21 B 1/22/ Электромеханический молот// И.П. Попов, В.И. Мошкин, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева. 27.11.2014. Бюл. № 31.

## ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ



УТВЕРЖДАЮ

Проректор КГУ по научной работе  
и инновационной деятельности

О.В. Филистеев

29 2017 г.

Акт  
о внедрении в учебный процесс  
результатов диссертационной работы  
Мошкина Владимира Ивановича

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы заведующего кафедрой «Энергетика и технология металлов» Мошкина В.И. «Импульсные линейные электромагнитные двигатели для технологий с высококонцентрированными потоками энергий» используются в учебном процессе в виде научных монографий: «Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием», «Импульсные линейные электромагнитные двигатели», «Импульсный линейный электромагнитный привод устройств маркирования и клеймения мелкоразмерных деталей и изделий», «Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях», в виде учебного пособия «Проектирование систем электрификации» в учебном процессе кафедры «Энергетика и технология металлов» при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» в курсе дисциплин «Электрические машины», «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах», «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах», «Электротехнологические промышленные установки», а также при дипломном проектировании.

Декан факультета «Транспортные системы»,  
к.т.н., доцент

Л.М. Савиных



ООО  
Научно-производственное  
предприятие  
**«АВИАСТЭК»**  
25 лет



Россия, 410071, г. Саратов, а/я 1002  
Тел: (845-2) -562501, -563809, -345650;  
Телефакс: (845-2) - 562501  
E-mail: npp@aviastek.ru; http://www.aviastek.ru  
ОКПО 12221640; ОГРН 1076455002535  
ИНН 6455046440; КПП 645501001

№ 27/073Д от 02.06. 2017 г.

### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Мошкина Владимира Ивановича «Импульсные линейные электромагнитные двигатели для технологий с высокочастотными потоками энергии»

Настоящий акт подтверждает, что материалы диссертационной работы Мошкина В.И., касающиеся разработки и создания пресового оборудования с электромагнитным приводом, переданы в ООО НПП «АВИАСТЭК» в виде технологической документации на следующие импульсные линейные электромагнитные двигатели:

№	Тип двигателя, мощность	Усилие	Ход	Частота ходов в мин.
1	ЛЭМД-641А, 220 В, 250 Вт	до 300 кГс	35 мм	200
2	ЛЭМД-641Б, 220 В, 400 Вт	до 700 кГс	40 мм	250
3	ЛЭМД-641В, 220 В, 700 Вт	до 1000 кГс	45 мм	300

Изготовленные нашим предприятием НПП «АВИАСТЭК» двигатели поставлялись для механизации технологических процессов холодной штамповки: пробивка отверстий, клепка, клеймение, чеканка, гибка и др., а также уплотнения формовочных смесей, крепления фурнитуры следующим организациям:

в 2009 г. – ООО «Эльбор-Инструмент», 174409, Новгородская обл., г. Боровичи, ул. Песочная, 30;  
в 2011 г. – ЗАО «Торгово-Промышленная Ассоциация «Промприбор Сервис», 308019, г. Белгород, ул. Ворошилова, 2а;  
- ФГУП «МПО «Металлист», 119071, г. Москва, 2-ой Донской проезд, 4;  
- ООО «ЮММ-Техно», 350059 г. Краснодар, ул. Новороссийская, 172;  
- ОАО «Новосибирский инструментальный завод», 630083, г. Новосибирск, ул. Большевикская, 177.

Двигатели надежны в эксплуатации, обладают высокими силовыми и энергетическими показателями.

Генеральный директор



Иванов М.В.

**Общество с ограниченной ответственностью  
«Зерно Духовницка»**

413900, Саратовская область, р.п. Духовническое, ул. Набережная, 1, ИНН 6411008102 КПП 641101001,  
р/сч 40702810514240001573, Филиал-БАНКА ВТБ (ПАО) в г. Нижнем Новгороде г. Нижний Новгород  
к/сч 30101810200000000837, БИК 042202837, ОКПО 12256414, ОГРН 1026401406987,  
E-mail: [zerno-dukhovnicka@yandex.ru](mailto:zerno-dukhovnicka@yandex.ru)

**АКТ**

**внедрения результатов диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук Мошкина Владимира Ивановича**

Настоящим актом подтверждаем внедрение в производство на хлебо-приемном пункте ООО «Зерно Духовницка» результатов диссертационной работы Мошкина В.И. «Импульсные линейные электромагнитные двигатели для технологий с высококонцентрированными потоками энергии», относящихся к разработке и созданию сводообрушителей на базе линейных электромагнитных двигателей.

Разработанные ударные машины позволяют упростить кинематические схемы альтернативных приводов, улучшить условие труда, снизить потребление энергии.

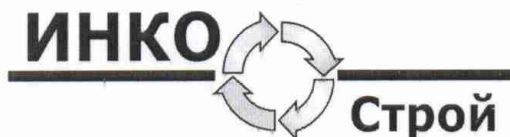
Главный инженер

А.В. Гришин

Утверждаю:

Директор





ООО «Инко Строй-Монтаж»  
г. Саратов, Огородная, 3, сектор А, корп. 1, оф. 3  
тел.: (8452) 47-60-60  
ИНН 6451429650  
КПП 645101001  
ОГРН 1116451002271

## АКТ

### внедрения результатов диссертационной работы Мошкина Владимира Ивановича

Результаты диссертационной работы «Импульсные линейные электромагнитные двигатели для технологий с высококонцентрированными потоками энергии» переданы в ООО «Инко Строй-Монтаж» для проектирования и изготовления переносного ударного электромагнитного комплекса для погружения металлических продольно-неустойчивых стержневых заземлителей в грунт.

Применение данного комплекса позволит механизировать технологический процесс погружения заземлителей в грунт на необорудованных электрической сетью площадках от автономных источников питания.

Технический директор

Низамов Р.Я.





ООО «СарЭлектро»  
410506, Саратовская область,  
Саратовский район, п.Расково,  
Сокурский тракт, ул.Подстанция-23  
Тел: (8452)77-44-29  
ИНН 6432017027 КПП 643201001  
ОГРН 1136432001089

## АКТ

### внедрения результатов диссертационной работы Мошкина Владимира Ивановича «Импульсные линейные электромагнитные двигатели для технологий с высококонцентрированными потоками энергии»

Настоящий акт подтверждает, что материалы диссертационной работы Мошкина В.И., относящиеся к разработке импульсных линейных электромагнитных двигателей, переданы в ООО «СарЭлектро» в виде технической документации в составе рабочих чертежей и опытного образца электромагнитного пресса усилием 8 кН с блоком питания и управления.

Результаты испытания пресса и рабочая документация использованы для разработки и изготовления энергоэффективного технологического оборудования с импульсным линейным электромагнитным приводом.

Начальник производства

Белоголовцев П.С.

Директор ООО «СарЭлектро»



Журавлев А.А.





# ДИПЛОМ

лауреата премии Губернатора Курганской  
области в сфере науки, техники и  
инновационной деятельности за 2011 год

в номинации *"Технические науки"*

настоящим дипломом награждается авторский  
коллектив в составе:

**Мошкина Владимира Ивановича**, заведующего кафедрой  
энергетики и технологии металлов Курганского государственного  
университета, кандидата технических наук, доцента,

**Неймана Владимира Юрьевича**, заведующего кафедрой  
теоретических основ электротехники Новосибирского  
государственного технического университета, доктора  
технических наук, профессора,

**Угарова Геннадия Григорьевича**, профессора кафедры  
электрооборудования промышленных предприятий Саратовского  
государственного технического университета имени Гагарина  
Ю.А., доктора технических наук,

за монографию *"Импульсные линейные  
электромагнитные двигатели"*.

Губернатор  
Курганской области

О.А.Богомолов

г. Курган